

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Optimalizace projekčního světlometu ve firmě Varroc Lighting
Systems**
**Headlamp Projector Optimization for Varroc Lighting Systems
Company**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Konečný**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Optimalizace projekčního světlometu ve firmě Varroc Lighting Systems
Headlamp Projector Optimization for Varroc Lighting Systems
Company**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Základní požadavky na světlomety
2. Světelné zdroje použitelné ve světlometech
3. Struktura a rozdělení světlometů
4. Simulační metody šíření světelného toku
5. Popis a funkce optimalizovaného projektoru
6. Výpočet a funkce textury na čočce projektoru
7. Měření fotometrických parametrů optimalizovaného projektoru
8. Posouzení navržených a změřených optických parametrů

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] DOHODA O PŘIJETÍ JEDNOTNÝCH TECHNICKÝCH PRAVIDEL PRO KOLOVÁ VOZIDLA -
Předpisy č. R08, R98, R112, R113, R123

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

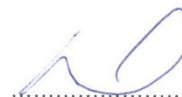
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.



Podpis

V Kopřivnici dne 23. 4. 2018

Bc. Martin Konečný

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.



Podpis

V Novém Jičíně dne 23. 4. 2018

Mgr. David Hýnar

Poděkování

Zejména bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. za odborné rady, ochotu a jeho čas při psaní této diplomové práce, Mgr. Mikuláši Zápražnému za odbornou pomoc při řešení problematiky a také společnosti Varroc Lighting Systems s.r.o., za umožnění zpracování diplomové práce.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je návrh a výpočet textury na čočce pro projektor D544 a následné zpracování analýzy. Nejprve jsou shrnuty nejdůležitější požadavky na světlomety a také používané světelné zdroje, včetně jejich porovnání. Dále je popsána struktura světloometu, jehož projektorový modul je předmětem této práce. Vysvětleny jsou rozdíly optických systémů, používaných ve světloometech a také princip optické simulace pomocí softwaru. V další části práce je charakteristika samotného projektoru D544. Na čočce tohoto projektoru následuje rozbor navržené textury. Tato čočka byla lisována čtyřmi typy výroby forem a poté podrobena analýze, zahrnující fotometrická měření, simulace a vzhledové vyhodnocení pomocí mikroskopu. V poslední kapitole jsou všechny tyto metody výroby porovnány. Z každého měření jsou zobrazeny fotometrické mapy, včetně fotometrických bodů, vzhledové fotografie a hodnoty gradientů, dle kterých jsme schopni určit ideální metodu výroby formy pro čočku dle požadavků.

Klíčová slova

LED dioda, gradient, hranice svazku, fotometrie, textura, čočka, homogenita, osvětlení, ohnisko, projektor

Abstract

The theme of this thesis is the design and calculation of the texture on the lens for the projector D544 and processing the analysis. At the first the most important requirements for the headlamps and used the light sources are summarized including their comparison. The structure of the headlamp whose projector's is the topic of this thesis is described. The thesis explain the differences between optical systems used in headlamps and the principles of the optical simulations by software. Following part of the thesis is the characteristic of the projector D544. On the lens of this projector follows an analysis of the proposed texture. This lens was formed in forms which were produce by four types of milling and then subjected to analysis including photometrical measurements, simulations and visual evaluation by microscope. In the last chapter all these production methods are compared. From each measurement are shows photometrical maps, including photometrical points, photographs, and values of the gradients. According to theese data we were able to determine the ideal method of manufacturing a mold for the lens as required.

Key Words

LED diode, gradient, boundary of the beam, photometry, texture, lens, homogeneity, illuminance, focal point, projector

Obsah

<i>Seznam některých použitých symbolů a zkratek</i>	9
<i>Seznam ilustrací</i>	10
<i>Seznam tabulek</i>	13
<i>Úvod</i>	14
<i>1. Základní požadavky na světlomety</i>	15
1.1. R08.....	18
1.2. R98.....	22
1.3. R112.....	26
1.4. R113.....	29
1.5. R123.....	35
<i>2. Světelné zdroje použitelné ve světlometech</i>	41
2.1. SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY	41
2.2. HALOGENOVÁ ŽÁROVKA	42
2.3. XENONOVÁ VÝBOJKA	43
2.4. LED DIODA.....	45
2.5. POROVNÁNÍ VÝSTUPNÍCH SVAZKŮ POUŽITÍM RŮZNÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	47
<i>3. Struktura a rozdělení světlometů</i>	50
3.1. STRUKTURA SVĚTLOMETŮ	50
3.2. ROZDĚLENÍ SVĚTLOMETŮ DLE OPTICKÝCH SYSTÉMŮ.....	54
3.2.1. Reflektorový systém.....	54
3.2.2. Projektor.....	56
<i>4. Simulační metody šíření světelného toku</i>	59
<i>5. Popis a funkce optimalizovaného projektoru</i>	63
5.1. ČOČKA.....	63
5.2. REFLEKTOR.....	64
5.3. CLONA	65
5.4. FUNKCE	66
5.5. ÚČINNOST PROJEKTORU D544	66
<i>6. Výpočet a funkce textury na čočce projektoru</i>	68
6.1. NURBS	68
6.2. V LIV A FUNKCE TEXTURY NA ČOČKU D544	69
<i>7. Měření fotometrických parametrů optimalizovaného projektoru</i>	73
7.1. POSTUP MĚŘENÍ	74
7.2. MĚŘENÍ ČOČKY – 3OSÉ FRÉZOVÁNÍ – NELEŠTĚNÁ FORMA	76
7.2.1. Měření gradientu – 3osé frézování – neleštěná forma	76
7.2.2. Výsledek fotometrického měření – 3osé frézování – neleštěná forma	77
7.2.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – 3osé frézování – neleštěná forma.....	77
7.3. MĚŘENÍ ČOČKY – 3OSÉ FRÉZOVÁNÍ – LEŠTĚNÁ FORMA.....	78

7.3.1. Měření gradientu – 3osé frézování – leštěná forma.....	78
7.3.2. Výsledek fotometrického měření – 3osé frézování – leštěná forma.....	79
7.3.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – 3osé frézování – leštěná forma	80
7.4. MĚŘENÍ ČOČKY – 5OSÉ FRÉZOVÁNÍ	80
7.4.1. Měření gradientu – 5osé frézování	80
7.4.2. Výsledek fotometrického měření – 5osé frézování	81
7.4.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – 5osé frézování	82
7.5. MĚŘENÍ ČOČKY – SPDT TECHNOLOGIE	82
7.5.1. Měření gradientu – SPDT technologie.....	82
7.5.2. Výsledek fotometrického měření – SPDT technologie	83
7.5.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – SPDT technologie	84
8. Posouzení navržených a změřených optických parametrů	85
8.1. POSOUZENÍ GRADIENTŮ	85
8.2. POSOUZENÍ VZHLEDU A KVALITY VÝROBY TEXTURY	85
8.3. POSOUZENÍ FOTOMETRIE	88
8.4. ZÁVĚR POSOUZENÍ	90
Závěr	91
Seznam literatury a použitých informačních zdrojů.....	93
Seznam příloh.....	95

Seznam některých použitých symbolů a zkratek

E	Intenzita osvětlení (lx)
I	Svítivost (cd)
P_l	Příkon (W)
T_c	Teplota chromatičnosti (K)
η_p	Měrný světelný výkon (lm. W ⁻¹)
Φ	Světelný tok (lm)
DRL	Daytime running lamp
LDM	Led drive modul
LED	Light emitting diode

Seznam ilustrací

<i>Obr. 1.1 Příklad fotometrické mapy potkávacího světla</i>	16
<i>Obr. 1.2 Příklad fotometrické mapy dálkového světla</i>	16
<i>Obr. 1.3 Kolorimetrický trojúhelník – definované hranice bílého světla dle předpisu R48</i>	18
<i>Obr. 1.4 Příklad homologační značky dle předpisu R08[1]</i>	19
<i>Obr. 1.5 Měřicí body na svislé stěně pro evropské světlo pro pravou stranu vozovky [1]</i>	20
<i>Obr. 1.6 Příklad homologační značky dle předpisu R98 [1]</i>	22
<i>Obr. 1.7 Příklad rozhraní [1]</i>	23
<i>Obr. 1.8 Rozložení měřicích bodů pro potkávací světlo [1]</i>	24
<i>Obr. 1.9 Ukázka (část) tabulky v předpisu R98 – fotometrické požadavky potkávacího světla [1]</i>	25
<i>Obr. 1.10 Rozložení měřicích bodů pro dálkové světlo [1]</i>	26
<i>Obr. 1.11 Příklad homologační značky dle předpisu R112 [1]</i>	27
<i>Obr. 1.12 Rozložení měřicích bodů pro potkávací světlo [1]</i>	28
<i>Obr. 1.13 Ukázka (část) tabulky v předpisu R112 – fotometrické požadavky potkávacího světla [1]</i> ..	28
<i>Obr. 1.14 Příklad homologační značky dle předpisu R113 [1]</i>	30
<i>Obr. 1.15 Poloha zkušebních bodů pro světlomet třídy A [1]</i>	32
<i>Obr. 1.16 Rozložení měřicích bodů pro dálkové světlo[1]</i>	34
<i>Obr. 1.17 Příklad homologační značky dle předpisu R123 [1]</i>	36
<i>Obr. 1.18 Úhlové polohy fotometrických požadavků potkávacího světla [1]</i>	37
<i>Obr. 1.19 Ukázka (část) tabulky v příloze předpisu R123 – fotometrické požadavky potkávacího světla [1]</i>	38
<i>Obr. 1.20 Ukázka (část) tabulky v příloze předpisu R123 – adaptace dálkového světla [1]</i>	40
<i>Obr. 2.1 Definice jasu [8]</i>	41
<i>Obr. 2.2 Konstrukce halogenové žárovky H7 [2]</i>	42
<i>Obr. 2.3 Příklad konstrukčního řešení halogenového projektoru</i>	43
<i>Obr. 2.4 Konstrukce xenonové výbojky [3]</i>	44
<i>Obr. 2.5 Příklad konstrukčního řešení xenonového projektoru</i>	44
<i>Obr. 2.6 Princip LED diody [5]</i>	46
<i>Obr. 2.7 Bílé světlo smícháním tří barev [6]</i>	47
<i>Obr. 2.8 Princip luminoforu a tvorba bílého světla [6]</i>	47
<i>Obr. 2.9 Příklad fotometrických map jednotlivých projektorů s použitím odlišných světelných zdrojů</i>	48
<i>Obr. 2.10 Příklad porovnání jednotlivých projektorů v simulačních SW</i>	49

<i>Obr. 3.1 Polypropylenové pouzdro</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 3.2 Struktura LDM.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 3.3 Připojení LDM. Vlevo LDM pro hlavní funkce, vpravo pro signální funkce a DRL</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 3.4 Popis komponentů v polypropylenovém pouzdře.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 3.5 Zadní strana polypropylenového pouzdra</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 3.6 Projektorový modul v polypropylenovém pouzdře.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 3.7 Kompletní lampa bez vnějšího skla, včetně krycích a designových plastových dílů.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 3.8 Světlomet Ford Lincoln [8].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 3.9 Princip parabolického reflektoru s optikou na skle [9].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 3.10 Princip free-form reflektoru [9]</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 3.11 Příklad složení základního svazku (free-form reflektor).....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 3.12 Příklad celkového základního svazku</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 3.13 Příklad řezu bifunkčním projektorem a jeho princip</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 3.14 Příklad clon (zleva): Statická (monofunkční projektor), pohyblivá – dvě polohy (bifunkční projektor), rotační clona splňující více funkcí.</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 4.1 Příklad šíření paprsků LED diody v Lightools</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 4.2 Situace průchodu paprsku dvěma rozhraními [10]</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 4.3 Simulace paprsků v Lightools.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 5.1 Konstrukční řešení LED projektoru D544.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 5.2 Plochy bikonvexní čočky D544.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 5.3 Navržená plocha reflektoru a její rozměry v mm.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 5.4 Vlevo fotometrická mapa s clonou a třetím pásmem, vpravo bez clony.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 5.5 Simulace paprsků projektorem D544.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 6.1 Křivka NURBS [12]</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6.2 NURBS plocha [13]</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6.3 Textura na čočce D544 při měření, reálný kus (vlevo), plocha textury na čočce D544 navržená v CAD (vpravo).....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6.4 Svazek D544 bez textury na čočce</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6.5 Svazek D544 s výslednou texturou na čočce.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6.6 Výstupní svazek bez textury (vlevo) a výstupní svazek s texturou (vpravo)</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 7.1 Naskenovaná čočka a převedena do formátu STL počítačového prostředí.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 7.2 Fotometrická mapa CAD simulace – požadovaný stav</i>	<i>74</i>

<i>Obr. 7.3 Fotometrická mapa CAD simulace s vyhodnocenými fotometrickými body</i>	74
<i>Obr. 7.4 Modul D544 na přípravku ve fotometrickém sále</i>	76
<i>Graf 7.1 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (3osá technologie, neleštěná forma)</i>	77
<i>Obr. 7.5 Změřená fotometrická mapa (3osá technologie, neleštěná forma)</i>	77
<i>Obr. 7.6 Fotometrická mapa – simulace STL (3osá technologie, neleštěná forma)</i>	78
<i>Graf 7.2 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (3osá technologie, leštěná forma)</i>	79
<i>Obr. 7.7 Změřená fotometrická mapa (3osá technologie, leštěná forma)</i>	79
<i>Obr. 7.8 Fotometrická mapa – simulace STL (3osá technologie, leštěná forma)</i>	80
<i>Graf 7.3 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (5osá technologie)</i>	81
<i>Obr. 7.9 Změřená fotometrická mapa (5osá technologie)</i>	81
<i>Obr. 7.10 Fotometrická mapa – simulace STL (5osá technologie)</i>	82
<i>Graf 7.4 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (SPDT technologie)</i>	83
<i>Obr. 7.12 Fotometrická mapa – simulace STL (SPDT technologie)</i>	84
<i>Obr. 8.1 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 3osá technologie – neleštěná forma</i>	86
<i>Obr. 8.2 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 3osá technologie – leštěná forma</i>	86
<i>Obr. 8.3 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 5osá technologie</i>	87
<i>Obr. 8.4 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 3osá technologie – neleštěná forma</i>	87
<i>Obr. 8.5 Porovnání fotometrie (shora) 3osá technologie – neleštěná forma, 3osá technologie – leštěná forma, 5osá technologie, SPDT technologie</i>	89

Seznam tabulek

<i>Tab. 1.1 Výpis předpisů v osvětlovacím automobilovém průmyslu.....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 1.2 Definované hranice bílého světla dle předpisu R48 [1]</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 1.3 Definované průsečíky dle předpisu R48 [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 1.4 Požadavky pro potkávací světlo [1]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 1.5 Požadavky pro dálkové světlo [1]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 1.6 Požadavky pro dálkové světlo [1]</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 1.7 Třídy světlometů s LED moduly [1]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 1.8 Tabulka souřadnic a příslušných svítivosti pro světlomet třídy A[1]</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 1.9 Tabulka požadovaných svítivostí pro hlavní dálkové světlo [1]</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 1.10 Požadavky pro dálkové světlo [1]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 2.1 Příklady materiálů a barev světla[14]</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5.1 Účinnost projektoru D544</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 8.1 Přehled naměřených gradientů jednotlivých čoček</i>	<i>85</i>

Úvod

Úvodem bych rád sdělil, že automobilový průmysl se čím dál více rozrůstá a v osvětlovacích systémech je to hodně znát. Požadavky jsou čím dál tím náročnější, jak na design, funkci, tak i na výrobu. V samotném projektoru jsou desítky dílů a každá nepřesnost výroby každého z nich má dopad na optický výstup ze světlometu. Na ten je kladen velký důraz ze strany zákazníka a z hlediska splnění předpisů.

Tato diplomová práce je rozdělena do osmi hlavních kapitol. Hned první kapitola stručně popisuje jednotlivé předpisy pro hlavní funkce světlometu. Ve druhé kapitole se věnuji použitými světelnými zdroji v automobilovém průmyslu, s důrazem na LED diody, které jsou dnes součástí snad každého světlometu. Třetí kapitola popisuje typy optických systémů, použitých ve světlometech a také rozpad světlometu pro automobil Ford Lincoln. Ve čtvrté kapitole vysvětluji, jakým zákonům optiky čelí naše simulační nástroje. V páté kapitole popisuji samotný projektor D544, použitý ve světlometu Ford Lincoln, který je předmětem této práce. V šesté kapitole je návrh textury na čočce projektoru a následně v kapitole sedmé jsou jednotlivé metody výroby této čočky s reálným měřením každé z nich. Osmá kapitola slouží k porovnání výsledků z měření a posouzení různých metod výroby.

Cílem této diplomové práce je navrhnout texturu na čočce tak, aby splňovala jak zákaznické, tak legitimní požadavky. Následně porovnat tři metody výroby této čočky a určit tu nejvhodnější.

1. Základní požadavky na světlomety

V automobilovém průmyslu musí téměř každá část automobilu podléhat homologacím. Velký důraz se klade na homologace pro osvětlení vozidla. Účelem těchto předpisů je, abychom sjednotili technická pravidla a určili podmínky homologací. Tato technická pravidla poukazují na bezpečnost, montáž, osvětlení světlomety apod. Úplné znění předpisu je: „Dohoda o přijetí jednotných technických pravidel pro kolová vozidla, zařízení a části, které mohou montovat a/nebo užívat na kolových vozidlech a o podmínkách pro vzájemné uznávání homologací, udělených na základě těchto pravidel.“

[1]

Tab. 1.1 Výpis předpisů v osvětlovacím automobilovém průmyslu

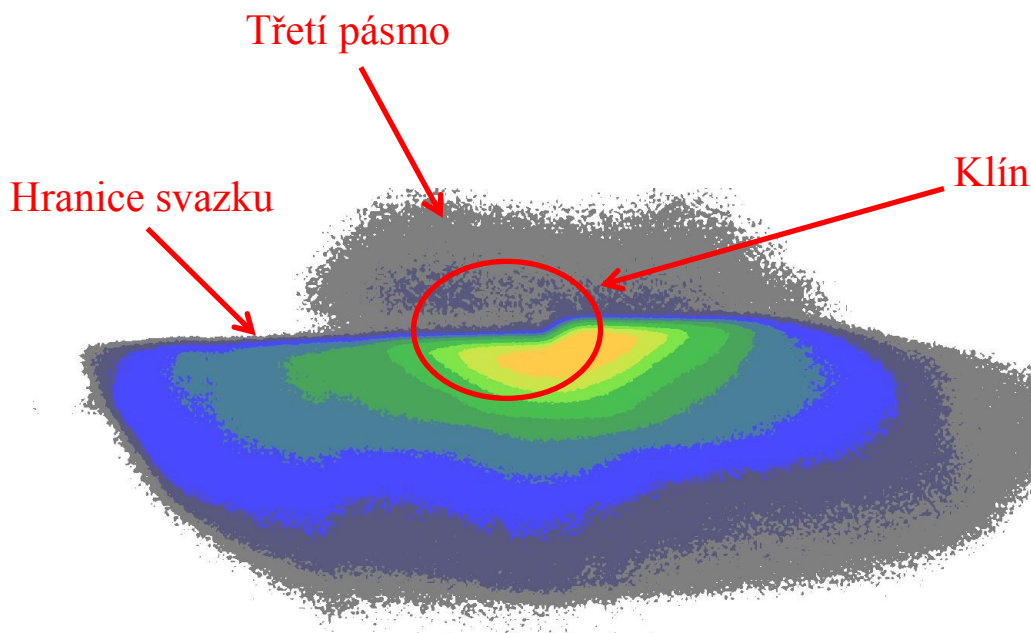
Předpis	Vztaženo na:
R01	Asymetrické světlomety s žárovkami R2 nebo HS1
R03	Odrazky
R04	Osvětlení SPZ
R06	Směrové svítilny
R07	Obrysové a brzdové svítilny
R08	Světlomety s žárovkami H1, H3, H7, H8, H9, H11, HB3, HB4, HIR1, HIR2
R19	Přední mlhové světlomety
R20	Asymetrické světlomety s žárovkou H4
R23	Zpětné světlomety
R37	Žárovky
R38	Zadní mlhové svítilny
R45	Zařízení k ostřikování světlometů
R48	Montáž osvětlovací techniky na vozidla
R50	Svítilny pro motocykly
R53	Montáž osvětlení na motocyklech
R65	Výstražné svítilny
R77	Parkovací svítilny
R74	Montáž osvětlení na mopedy
R87	Denní svítilny
R91	Boční obrysové svítilny
R98	Světlomety s výbojkami
R99	Xenonové světelné zdroje
R112	Halogenové světlomety
R113	Symetrické světlomety
R119	Rohové světlomety
R123	AFS světlometové systémy

My se zde především zabýváme předními světlomety, a to hlavními funkcemi, které jsou potkávací a dálková světla. Proto v této kapitole budou popsány předpisy těchto hlavních funkcí. V prvé řadě je třeba si vysvětlit rozdíl mezi potkávacím a dálkovým světlem.

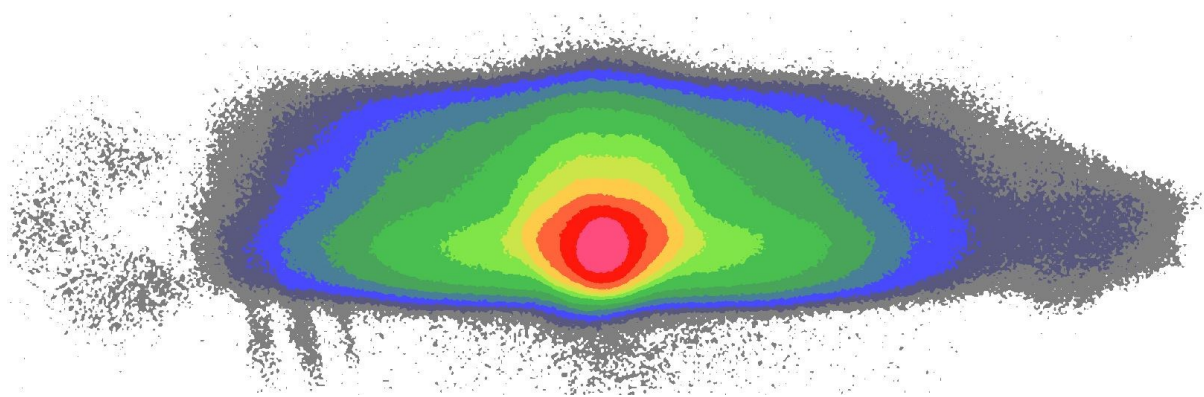
Potkávací světlo je navrženo tak, abychom neoslňovali protijedoucí řidiče a mohli tak využít toto svícení po celou dobu jízdy. Toho docílíme aplikací speciální clony, která má specifický výřez a zamezí průniku světla do oblasti protijedoucího řidiče. Tomuto výřezu říkáme „klín“.

Dálková funkce není vybavena žádnou clonou a je navržena tak, aby nejvíce světelného toku bylo koncentrováno právě do středu vozovky a umožnila nám vidět do dálky.

Na obrázku 1.1 je příklad fotometrické mapy potkávacího světla, kde je názorně zobrazen klín. Dále také hranice svazku a třetí pásmo. Třetí pásmo slouží k tomu, abychom neměli nad svazkem nulové intenzity a vznikl tak pro řidiče lepší dojem a také aby byla tato oblast částečně osvětlena. V praxi by třetí pásmo nemělo přesáhnout hodnotu 1 lx. Na obrázku 1.2 je zobrazen příklad dálkové funkce. Musím podotknout, že každý světlomet je specifický a tvar svazku se může lišit. S dobou také narůstají požadavky, jako například na segmentaci výstupního svazku (matrix), která v budoucnu bude nedílnou součástí každého světlometu na cestách. Pro představu, nedávno měla ještě potkávací funkce do deseti LED zdrojů. Dnes už jsou automobily, jejichž světlometry jsou osazeny například i šedesáti LED zdroji. Fotometrické mapy jsou zobrazené pomocí simulace na svislé měřicí stěně vzdálené 25 m. Barevná škála zobrazuje intenzitu osvětlení, přičemž červená znázorňuje 90 lx a tmavě modrá 1 lx.



Obr. 1.1 Příklad fotometrické mapy potkávacího světla



Obr. 1.2 Příklad fotometrické mapy dálkového světla

Každý svazek musí také, splňovat požadavky co se týče vzhledu. Takovýto svazek nazýváme homogenní. Homogenní svazek je svazek bez jakýchkoliv tmavých, či naopak příliš světlých oblastí. Ve svazku nevidíme tak žádné pruhy či jiné prvky, které by mohly mít negativní dopad na řidiče.

Ještě, než se dostaneme k samotným předpisům, často se v nich objevuje, že barva vyzařovaného světla je bílá. Tato specifikace není dále v těchto předpisech definována. K tomuto slouží předpis R48, který nám jasně hovoří o tom, že „bílá“ znamená chromatické souřadnice (x, y) vyzařovaného světla, které leží v kolorimetrickém trojúhelníku definované hranicemi. Tyto hranice jsou v tabulce 1.2 [1].

Tab. 1.2 Definované hranice bílého světla dle předpisu R48 [1]

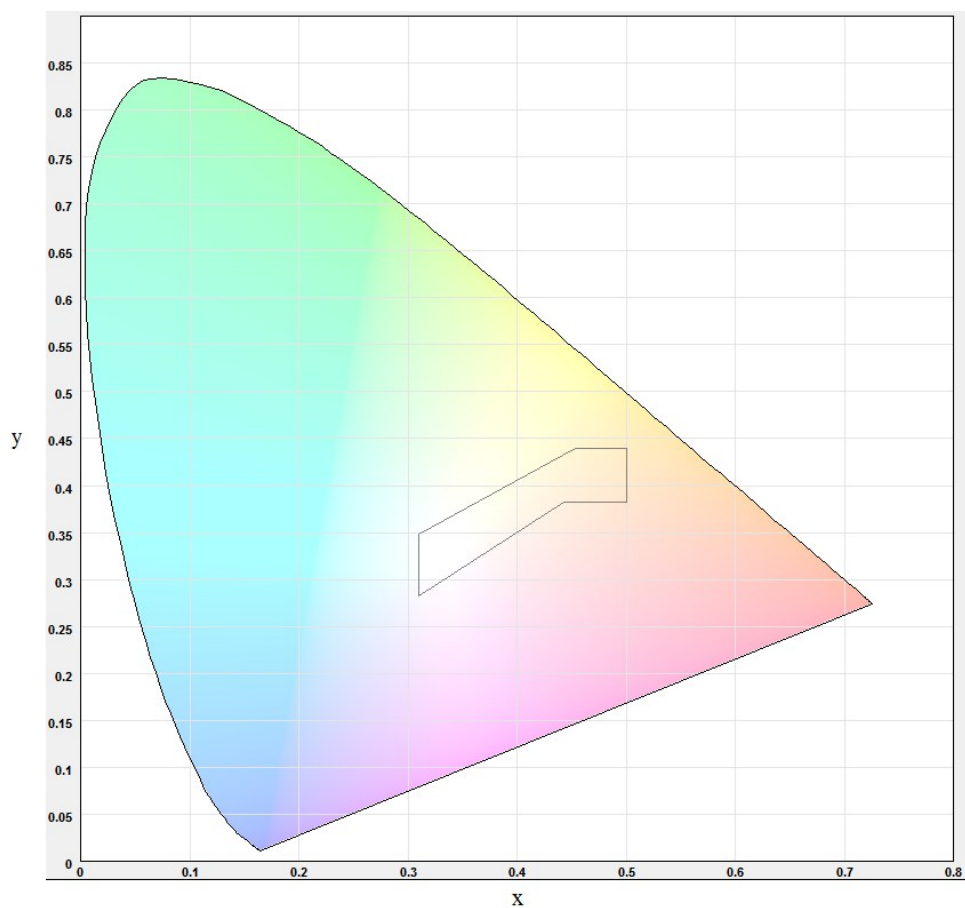
W_{12}	Hranice se zelenou	$y = 0,150 + 0,640x$
W_{23}	Hranice se žlutozelenou	$y = 0,440$
W_{34}	Hranice se žlutou	$x = 0,500$
W_{45}	Hranice s červenofialovou	$y = 0,382$
W_{56}	Hranice k fialové	$y = 0,050 + 0,750x$
W_{61}	Hranice k modré	$x = 0,310$

Hranice jsou dále definovány průsečíky v tabulce 1.3.

Tab. 1.3 Definované průsečíky dle předpisu R48 [1]

	x	y
W_1	0,310	0,348
W_2	0,453	0,440
W_3	0,500	0,440
W_4	0,500	0,382
W_5	0,443	0,382
W_6	0,310	0,283

Dle tabulky 1.2 a 1.3 vytvoříme oblast pro barvu světla dle předpisu.



Obr. 1.3 Kolorimetrický trojúhelník – definované hranice bílého světla dle předpisu R48

Na obrázku 1.3 je zobrazen kolorimetrický trojúhelník a definované hranice a průsečíky dle tabulek 1.2 a 1.3. Intenzita barevného podnětu je dána součtem intenzit všech tří trichromatických složek $X+Y+Z$. V případě na obrázku 1.3 neuvažujeme intenzitu, ale pouze barevný tón a sytost. Proto je diagram zobrazen v rovině x a y [7].

1.1. R08

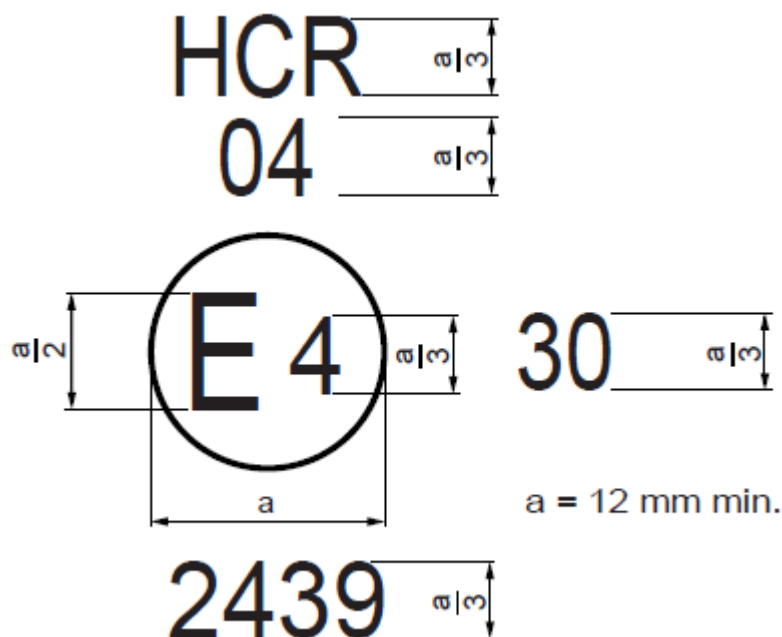
Úplné znění předpisu: Jednotná ustanovení pro homologaci světlometů pro motorová vozidla, vyzařujících asymetrické potkávací světlo nebo dálkové světlo nebo obojí a vybavených halogenovými žárovkami (H_1 , H_2 , H_3 , HB_3 , HB_4 , H_7 , H_8 , H_9 , $HIR1$, $HIR2$ a/nebo H_{11}) [1].

Tento předpis platí pro světlomety motorových vozidel, které mohou mít rozptylová skla z plastového materiálu [1].

Značení

Značka homologace musí být v kružnici a značí se písmenem E a následně číslicí státu, ve kterém byla homologace provedena. Pro Českou republiku je to například číslo 8. Dále rozlišujeme levostranný a pravostranný provoz, který značíme šipkou. Pro levostranný provoz je to šipka směřující k pravému okraji vozovky, tedy k okraji, při kterém se doprava pohybuje. Vše je myšleno z pohledu

zepředu světlometu. Dále rozlišujeme, jestli požadavky vyhovují pro potkávací světlo, značeno HC, dálkové světlo, značeno HR, nebo obě funkce, značeno HRC [1].



Obr. 1.4 Příklad homologační značky dle předpisu R08 [1]

Světlomet, opatřený výše uvedenou značkou homologace, je světlomet homologovaný v Nizozemsku (E4) pod číslem homologace 2439, vyhovující požadavkům tohoto předpisu, změněného sérií změn 04 a 05, jak pro potkávací světlo, tak i pro dálkové světlo (HCR) a je určen jen pro pravostranný provoz. Číslo 30 udává, že maximální svítivost dálkového světla je v rozmezí od 86,250 do 101,250 cd [1].

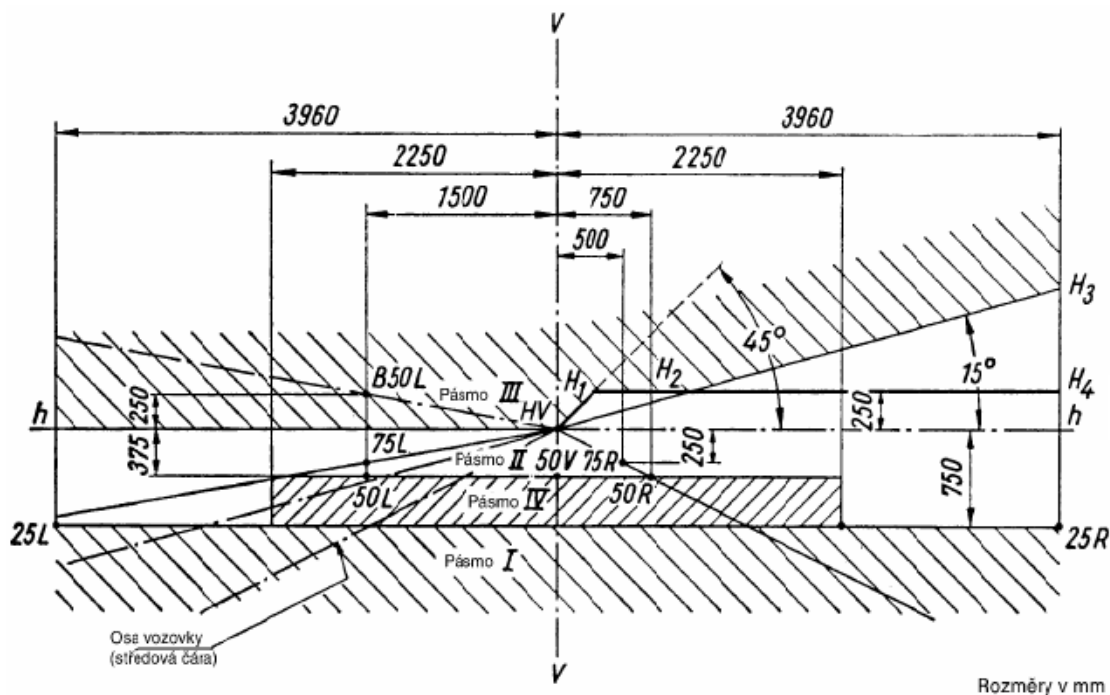
Osvětlení

Světlometry musejí být provedeny tak, aby s vhodnými žárovkami H₁, H₂, H₃, HB₃, HB₄, H₇, H₈, H₉, HIR1, HIR2 a/nebo H₁₁ dávaly neoslňující, avšak dostatečné osvětlení potkávacím světlem a dobré osvětlení dálkovým světlem [1].

Osvětlení světlometem se ověřuje na svislé měřicí stěně, umístěné ve vzdálenosti 25 m před světlometem kolmo k jeho ose [1].

Světlomet se považuje za vyhovující, jestliže jsou splněny fotometrické požadavky aspoň s jednou standardní žárovkou 12 V, která může být dodána se světlometem [1].

Potkávací světlo:



Obr. 1.5 Měřící body na svislé stěně pro evropské světlo pro pravou stranu vozovky [1]

Potkávací světlo musí vytvářet tak zřetelné rozhraní, aby umožňovalo dobré seřízení. Rozhraní musí tvořit vodorovnou přímku na straně opačné směru provozu, pro který je světlomet určen; na opačné straně nesmí rozhraní přesahovat ani lomenou čáru HV $H_1 H_4$, tvořenou přímkou HV H_1 , svírající s vodorovnou přímkou úhel 45° a přímkou $H_1 H_4$, ležící 25 cm nad přímkou hh, ani přes přímku HV H_3 , skloněnou v úhlu 15° nad horizontálu. Rozhraní, přesahující jak čáru HV H_2 , tak přímkou $H_2 H_4$ a vyplývající z kombinace obou výše uvedených možností není v žádném případě přípustné [1].

Pokud takto seřízený světlomet nevyhovuje, je dovoleno posunout svazek do stran o 1° .

Tab. 1.4 Požadavky pro potkávací světlo [1]

Bod na měřicí stěně				Požadované osvětlení [lx]
Světlomety pro pravostranný provoz		Světlomety pro levostranný provoz		
Bod B	50 L	Bod B	50 L	≤ 0,3
Bod 75	R	Bod 75	R	≥12
Bod 75	L	Bod 75	L	≤12
Bod 50	L	Bod 50	L	≤15
Bod 50	R	Bod 50	R	≥12
Bod 50	V	Bod 50	V	≥ 6
Bod 25	L	Bod 25	L	≥ 2
Bod 25	R	Bod 25	R	≥ 2
Kterýkoli bod v pásmu III				≤ 0,7
Kterýkoli bod v pásmu IV				≥ 3
Kterýkoli bod v pásmu I ≤ 2 x (E50R nebo E50L)				

Dálkové světlo:

Jde-li o světlomet konstruovaný jak pro dálkové, tak pro potkávací světlo, měří se osvětlení měřicí stěny dálkovým světlem při stejném seřízení světlometu, jako při měřeních podle tabulky výše. Jde-li o světlomet konstruovaný jen pro dálkové světlo, seřídí se tak, aby plocha největšího osvětlení byla soustředěna na průsečík přímek hh a vv [1].

Průsečík (HV) přímek hh a vv musí být uvnitř izoluxy 80 % maximálního osvětlení. Tato maximální hodnota (E_M) nesmí být menší než 48 lx. Maximální hodnota nesmí v žádném případě být větší než 240 lx. Kromě toho nesmí tato maximální hodnota u kombinace potkávacího a dálkového světla být větší než 16násobek osvětlení, naměřeného u potkávacího světla v bodě 75 R (nebo 75 L) [1].

Vychází-li se z bodu HV vodorovně vpravo a vlevo, nesmí osvětlení být menší než 24 lx až do vzdálenosti 1.125 m, ani menší než 6 lux až do vzdálenosti 2.25 m [1].

Dále se zkouší po vertikálním přesunutí odražeče ze základní polohy seřizovacím zařízením světlometů o $\pm 2^\circ$ nebo do krajní polohy, je-li tato menší než 2° . Po přestavení světlometu jako celku (např. pomocí goniometru) do odpovídající opačné polohy, se musí světelný výstup kontrolovat v dále uvedených směrech a musí být v požadovaných mezích [1]:

potkávací světlo: body HV a 75R (resp. 75L);

dálkové světlo: I_M a bod HV (v procentech I_M) [1].

Barevná rozptylová skla a filtry

Homologaci lze získat pro světlomety, vyzařující s bezbarvou žárovkou buď bezbarvé světlo, nebo světlo barvy selektivní žluté. V trichromatických souřadnicích Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) jsou vyjádřeny kolorimetrické charakteristiky [1].

Obtěžování

Musí se přezkoušet, zda světlomet svým potkávacím světlem neobtěžuje [1].

1.2. R98

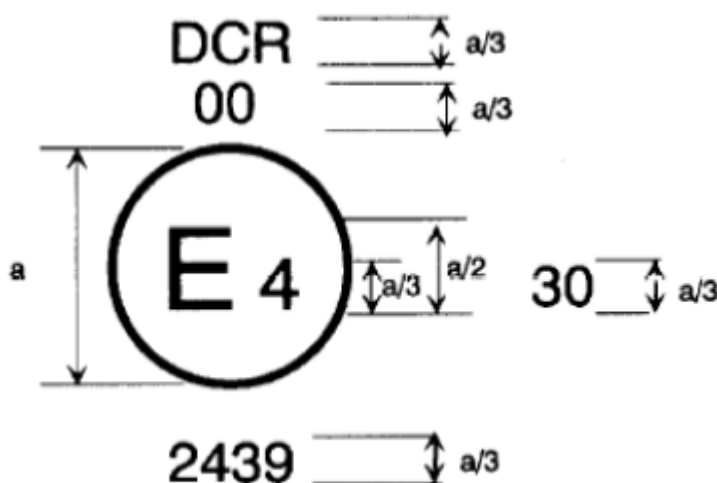
Úplné znění předpisu: Jednotná ustanovení pro schvalování světlometů pro motorová vozidla vybavených výbojkovými zdroji světla [1].

Tento předpis se vztahuje na světlometry využívající výbojkové zdroje světla, u vozidel kategorií M, N a L₃ [1].

Značení

Světlometry předkládané ke schválení musí být čitelně a nesmazatelně označeny obchodním názvem nebo značkou žadatele [1].

Značka homologace je podobná jako u předešlého předpisu. Rozdílem jsou označení pro pravostranný a levostranný provoz. Pro pravostranný provoz značíme R/D, pro levostranný pak L/G. Odlišné je i značení pro potkávací a dálkové světlo. Zde označujeme DC, DR, DCR [1].



Obr. 1.6 Příklad homologační značky dle předpisu R98 [1]

Světlomet opatřený výše uvedenou schvalovací značkou je světlomet, který byl schválen v Nizozemí (E4) pod schvalovacím číslem 2439 a splňující požadavky tohoto předpisu v jeho původním znění (00). Potkávací světlo je konstruováno pouze pro pravostranný provoz. Číslo 30 udává, že maximální svítivost dálkového světla je v rozmezí 123 625 až 145 125 cd [1].

Osvětlení

Světlometry musí být provedeny tak, aby s vhodnými výbojkovými zdroji světla dávaly dostatečné osvětlení potkávacím světlem bez oslňování a dobré osvětlení dálkovým světlem [1].

Svítivost světlometu se měří ve vzdálenosti 25 m fotoelektrickým článkem, který má užitečnou plochu uvnitř čtverce o straně 65 mm. Bod HV je střed souřadnicového systému se svislou polární osou. Přímka h je vodorovná a prochází bodem HV [1].

Potkávací světlo:

Rozdělení svítivosti potkávacího světla světlometu musí obsahovat „rozhraní“, které umožní, aby světlomet byl správně nastaven na fotometrické měření a pro zaměření na vozidle [1].

„Rozhraní“ musí poskytovat:

(a) Pro pravostranný provoz:

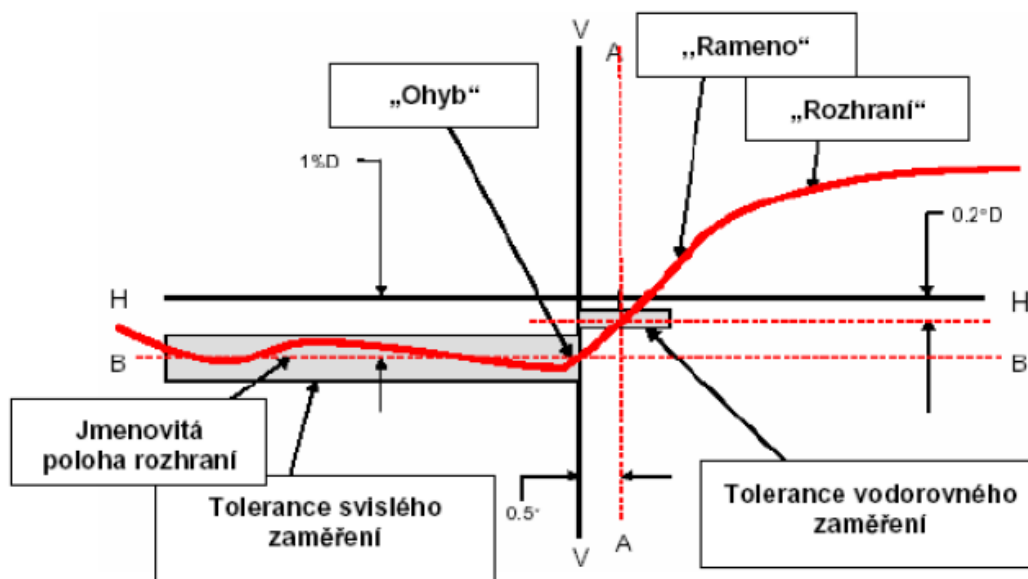
(I) rovnou „vodorovnou část“ směrem vlevo;

(II) zdvižená část „ohyb – rameno“ směrem vpravo.

(b) Pro levostranný provoz:

(I) rovnou „vodorovnou část“ směrem vpravo;

(II) zdvižená část „ohyb – rameno“ směrem vlevo [1].



Obr. 1.7 Příklad rozhraní [1]

Správné nastavení potkávacího světla je takové, když přímka B je ve jmenovité poloze. Tato poloha je 1 % pod H-H, což znamená $0,57^\circ$ [1].

Pro vodorovné nastavení: část rozhraní „ohyb – rameno“ se posune:

pro pravostranný provoz zprava doleva a vodorovná poloha po jeho posunutí je tato:

- (a) nad přímkou $0,2^\circ$ D „rameno“ nesmí přesahovat přímku A vlevo;
- (b) na přímce $0,2^\circ$ D nebo pod ní „rameno“ by mělo překročit přímku A;
- (c) "ohyb" ramene je umístěn uvnitř $\pm 0,5^\circ$ vlevo nebo vpravo od přímky V-V;

nebo

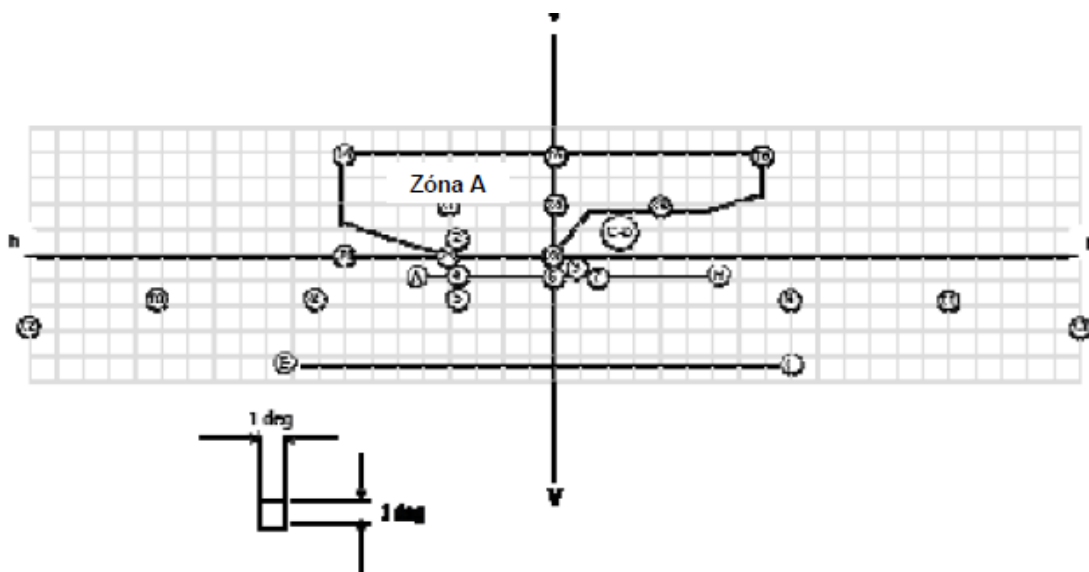
pro levostranný provoz zleva doprava a vodorovná poloha po jeho posunutí je tato:

- (a) nad přímkou $0,2^\circ$ D „rameno“ nesmí přesahovat přímku A vpravo a
- (b) na přímce $0,2^\circ$ D nebo pod ní „rameno“ by mělo překročit přímku A, a
- (c) uzel „ohybu“ by měl být zejména na přímce V-V [1].

Pokud i tak nevyhovuje světlomet požadavkům, můžeme si vypomocť posunutím vodorovné přímky A, za předpokladu, že osa svazku se neposune. Posunutí pak můžeme realizovat o $0,5^\circ$ vlevo a $0,75^\circ$ vpravo pro pravostranný provoz. Pro levostranný provoz je to naopak [1].

Dále svisle, ne více než $0,25^\circ$ nahoru nebo dolů z přímky B [1].

Takto nastavené rozhraní slouží dále k vyhodnocení měřicích bodů uvedených v tomto předpise [1].



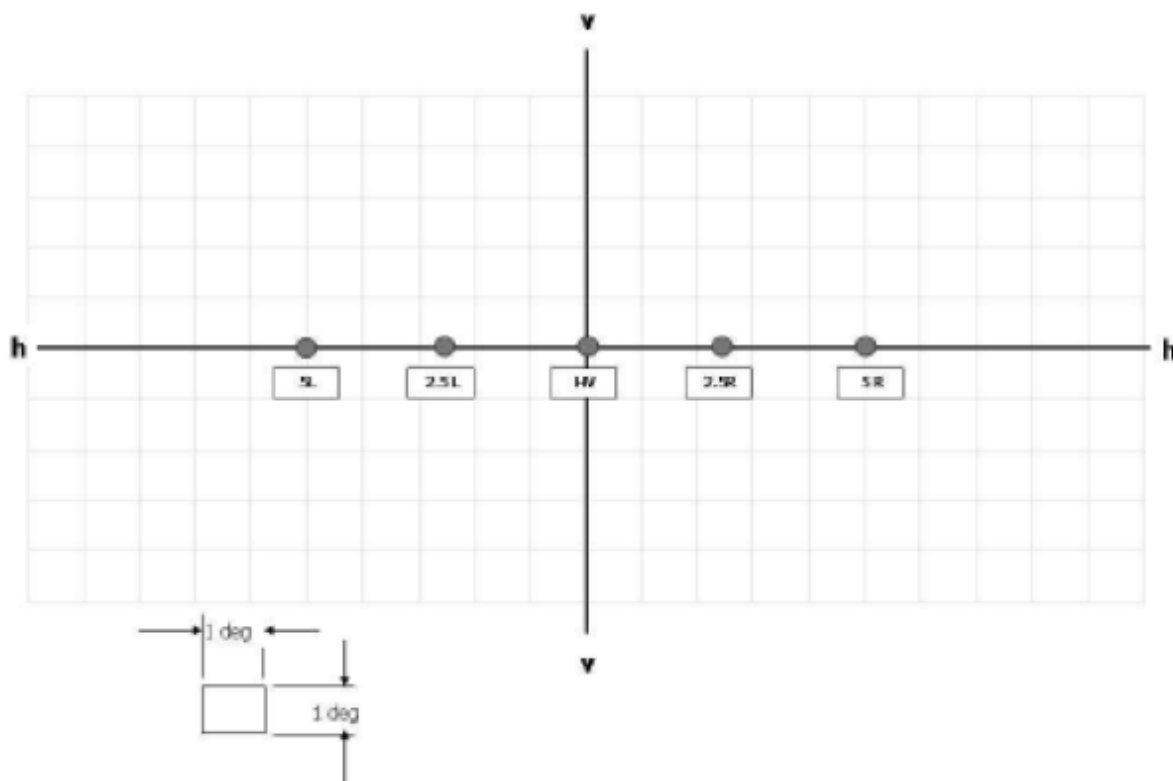
Obr. 1.8 Rozložení měřicích bodů pro potkávací světlo [1]

Body nebo pásma	Označení **/ Libovolný bod v pásmu A (ohraničený následujícími souřadnicemi ve stupních) 8L 8L 8R 8R 6R 1.5R V-V 4L 1U 4U 4U 2U 1.5U 1.5U H-H H-H	Svítivost (cd)		Vodorovný úhel (°)	Svislý úhel (°)
		Max	Min		
		625			
1	vypouští se				
2	B 50 L	350		3.43 L	0.57 U
3	75 R		12 500	1.15 R	0.57 D
4	50 L	18 480		3.43 L	0.86 D
5	25 L1	18 800		3.43 L	1.72 D
6	50 V		7 500	0	0.86 D
7	50 R		12 500	1.72 R	0.86 D
8	25 L2		2 500	9 L	1.72 D
9	25 R1		2 500	9 R	1.72 D
10	25 L3		1 250	15 L	1.72 D

Obr. 1.9 Ukázka (část) tabulky v předpisu R98 – fotometrické požadavky potkávacího světla [1]

Dálkové světlo:

Jedná-li se o světlomet konstruovaný jak pro dálkové, tak pro potkávací světlo, měření svítivosti dálkového světla se provede při stejném seřízení světlometu jako při měření potkávací funkce; jedná-li se o světlomet konstruovaný jen pro dálkové světlo, seřídí se tak, aby oblast maximální svítivosti byla soustředěna na průsečík čar H-H a V-V; takový světlomet musí vyhovovat pouze požadavkům dálkového světla [1].



Obr. 1.10 Rozložení měřicích bodů pro dálkové světlo [1]

Průsečík (HV) přímek HH a VV musí být uvnitř izoluxy, která představuje 80 % maximální svítivosti. Tato maximální hodnota nesmí být menší než 43 800 cd [1].

Tab. 1.5 Požadavky pro dálkové světlo [1]

Zkušební bod	Úhlové souřadnice [°]	Požadovaná minimální svítivost [cd]
H-5L	0.0, 5.0 L	6 250
H-2.5L	0.0, 2.5 L	25 000
H-2.5R	0.0, 2.5 R	25 000
H-5R	0.0, 5.0 R	6 250

Oslnění

Oslňování a/nebo nezpůsobilost způsobené potkávacím světlem světlometu musí být přezkoušeny [1].

1.3. R112

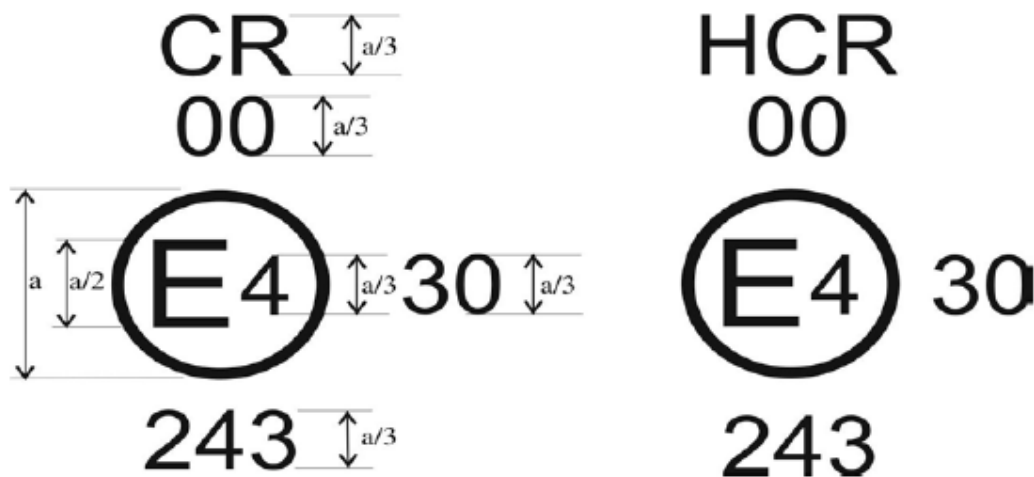
Úplné znění předpisu: Jednotná ustanovení pro schvalování světlometů motorových vozidel, které vyzařují asymetrické potkávací světlo nebo dálkové světlo nebo obojí a které jsou vybaveny žárovkami a/nebo led moduly [1].

Tento předpis se vztahuje na světlomety vozidel kategorií L, M, N a T [1].

Značení

Značení je opět „E“ v kružnici. Za písmenem dále následuje číslo státu, který schválení udělil [1].

Pro levostranný provoz je stejné označení jako u předpisu R08. Tedy šipka k pravé straně vozovky. Rozdílem je opět označení potkávacího a dálkového světla. Značení pro potkávací světlo je C pro světlomet třídy A, pro světlomet třídy B je to pak HC. U dálkového světla je to písmeno R pro světlomet třídy A, a pro světlomet třídy B pak HR. U světlometů, které splňují obě funkce je označení složením obou písmen, tedy CR a HCR [1].



Obr. 1.11 Příklad homologační značky dle předpisu R112 [1]

Světlomet, opatřený jednou z výše uvedených značek schválení, je světlomet schválený v Nizozemsku (E4) dle předpisu č. 112 pod číslem schválení 243, vyhovující požadavkům série změn 01 tohoto předpisu. Potkávací světlo je konstruováno pouze pro pravostranný provoz. Písmena CR udávají, že se jedná o světlomet třídy B s potkávacím i dálkovým světlem. Číslo 30 udává, že maximální svítivost dálkového světla je v rozmezí 123 625 až 145 125 cd [1].

Osvětlení

Světlometry musí být provedeny tak, aby dávaly dostatečné dobré osvětlení bez oslnění, když vyzařují potkávací světlo a dobré osvětlení, když vyzařují dálkové světlo. Světlo do zatáčky může být vytvářeno jedním doplňkovým zdrojem světla nebo jedním nebo několika LED moduly, které jsou součástí světlometu s potkávacím světlem [1].

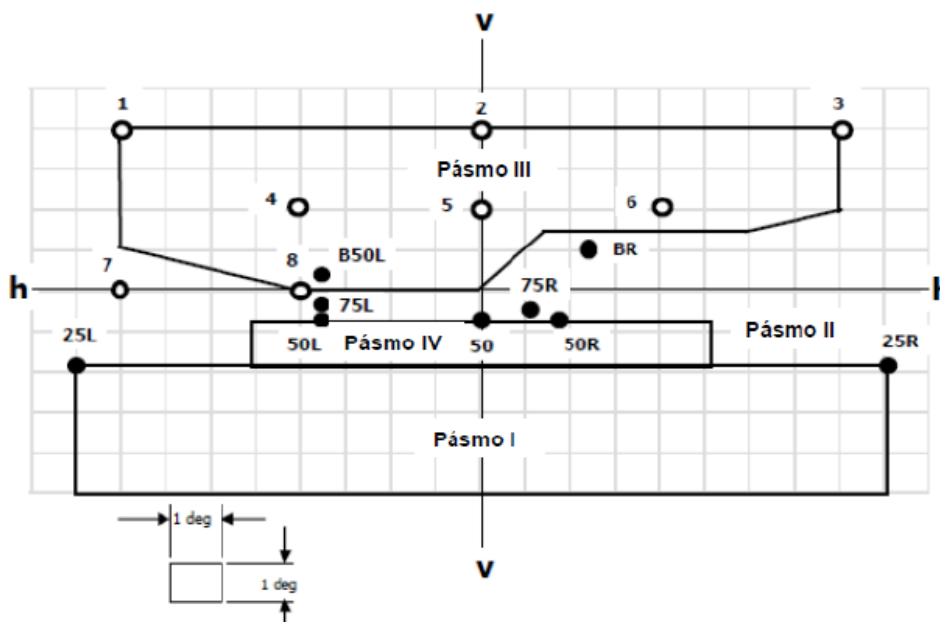
Svítivost světlometu se měří ve vzdálenosti 25 m fotoelektrickým článkem, který má užitečnou plochu uvnitř čtverce o straně 65 mm. Bod HV je střed souřadnicového systému se svislou polární osou. Přímka h je vodorovná a prochází bodem HV [1].

Potkávací světlo:

Rozdělení svítivosti potkávacího světla světlometu musí obsahovat „rozhraní“, které umožní, aby světlomet byl správně nastaven na fotometrické měření a pro zaměření na vozidlo [1].

Nastavení rozhraní je popsáno v předpise R98 v kapitole 1.2 osvětlení a na obrázku 1.7.

Při takto nastaveném rozhraní, lze vyhodnocovat zkušební body. Ty jsou zobrazeny na obrázku 1.12.



Obr. 1.12 Rozložení měřicích bodů pro potkávací světlo [1]

Světlomety pro pravostranný provoz (RHT) **/		Světlomet třídy A		Světlomet třídy B	
Označení zkušebního bodu	Úhlové souřadnice zkušebního bodu (°)	Požadovaná svítivost (cd)		Požadovaná svítivost (cd)	
		Max	Min	Max	Min
B 50 L	0.57U, 3.43L	350		350	
BR	1.0 U, 2.5 R	1 750		1 750	
75 R	0.57D, 1.15R		5 100		10 100
75 L	0.57D, 3.43L	10 600		10 600	
50 L	0.86D, 3.43L	13 200 ***/		13 200 ***/	

Obr. 1.13 Ukázka (část) tabulky v předpisu R112 – fotometrické požadavky potkávacího světla [1]

Dálkové světlo:

Jedná-li se o světlomet konstruovaný jak pro dálkové, tak pro potkávací světlo, měření svítivosti dálkového světla se provede při stejném seřízení světlometu jako při měření potkávací funkce. Jedná-li se o světlomet konstruovaný jen pro dálkové světlo, seřídí se tak, aby oblast maximální svítivosti byla soustředěna na průsečík čar H-H a V-V. Takový světlomet musí vyhovovat pouze požadavkům dálkového světla [1].

Pro dálková světla je naprosto stejný předpis jako u R98 s rozdílem hodnot svítivosti v určitých měřicích bodech.

Tab. 1.6 Požadavky pro dálkové světlo [1]

Zkušební bod	Úhlové souřadnice [°]	Požadovaná minimální svítivost [cd]	Požadovaná minimální svítivost [cd]
		Světlomet třídy A	Světlomet třídy B
I_{\max}		27000	40500
H-5L	0.0, 5.0 L	3400	5100
H-2.5L	0.0, 2.5 L	13500	20300
H-2.5R	0.0, 2.5 R	12500	20300
H-5R	0.0, 5.0 R	3400	5100

Průsečík (HV) přímek hh a vv musí být uvnitř izoluxy, která představuje 80 % maximální svítivosti (I_{\max}). Tato maximální hodnota za žádných okolností nesmí překročit 215 000 cd [1].

Barva

Barva vyzařovaného světla musí být bílá [1].

Oslnění

Oslňování způsobené potkávacím světlem světlometu musí být přezkoušeno [1].

1.4. R113

Úplné znění předpisu: Jednotná ustanovení pro schvalování světlometů motorových vozidel, které vyzařují symetrické potkávací světlo nebo dálkové světlo nebo obojí a které jsou vybaveny žárovkami nebo výbojkovými zdroji světlo nebo LED moduly [1].

Tento předpis se vztahuje na světlometry vozidel kategorií L a T [1].

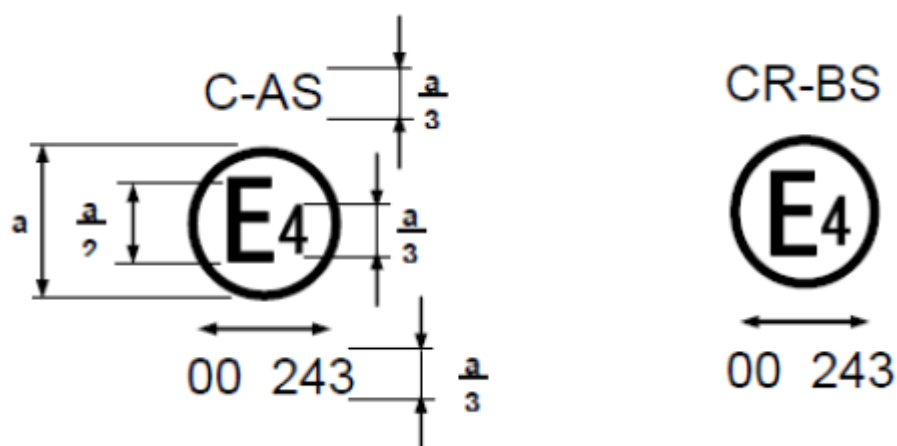
Značení

Značení je opět „E“ v kružnici. Za písmenem dále následuje číslo státu, který schválení udělil [1].

U světlometů, které splňují požadavky tohoto předpisu pouze pro potkávací světlo, písmena „C-AS“ pro světlometry třídy A nebo písmena „C-BS“ pro světlometry třídy B, nebo písmena „WC-CS“ pro světlomet třídy C nebo písmena „WC-DS“ pro světlomet třídy D nebo písmena „WC-ES“ pro světlomet třídy E [1].

U světlometů, které splňují požadavky tohoto předpisu pouze pro dálkové světlo, písmena „R-BS“ pro světlometry třídy B, nebo písmena „WR-CS“ pro světlomet třídy C nebo písmena „WR-DS“ pro světlomet třídy D nebo písmena „WR-ES“ pro světlomet třídy E [1].

U světlometů, které splňují požadavky tohoto předpisu jak pro potkávací světlo, tak pro dálkové světlo, písmena „CR-BS“ pro světlometry třídy B, nebo písmena „WCR-CS“ pro světlomet třídy C nebo písmena „WCR-DS“ pro světlomet třídy D nebo písmena „WCR-ES“ pro světlomet třídy E [1].



Obr. 1.14 Příklad homologační značky dle předpisu R113 [1]

Světlomet, opatřený jednou z výše uvedených značek schválení, je světlomet schválený v Nizozemsku (E4) dle předpisu č. 113 pod číslem schválení 243, vyhovující požadavkům série změn 00 tohoto předpisu. Písmena C-AS udávají, že se jedná o světlomet třídy A s potkávacím světlem a písmena CR-BS udávají, že se jedná o světlomet třídy B s potkávacím i dálkovým světlem [1].

Osvětlení

Světlomety musí být vybaveny žárovkovým zdrojem (zdroji) světla schváleným dle předpisu č. 37 a/ nebo LED modulem (moduly) [1].

Pro hlavní potkávací světlo je možné použít dva žárovkové zdroje světla a pro dálkové světlo několik žárovkových zdrojů světla. Může být použita kterákoliv žárovka dle předpisu č. 37, za předpokladu, že [1]:

- (a) není žádné omezení v použití dle předpisu č. 37 a jeho sérií změn platných v době žádosti o schválení;
- (b) pro třídu A a B referenční světelný tok hlavního potkávacího světla při 13,2 V nepřekročí 900 lm.
- (c) pro třídu C a D referenční světelný tok hlavního potkávacího světla při 13,2 V nepřekročí 2 000 lm [1].

Dále, musí být světlomet zkonstruován tak, aby žárovku nebylo možné namontovat v jiné než správné poloze [1].

U LED modulů třídíme světlomety dle tabulky 1.7.

Tab. 1.7 Třídy světlometů s LED moduly [1]

	Světlomet třídy A [lm]	Světlomet třídy B [lm]	Světlomet třídy C [lm]	Světlomet třídy D [lm]	Světlomet třídy E [lm]
Hlavní potkávací světlo, minimum	150	350	500	1000	2000
Hlavní potkávací světlo, maximum	900	1000	2000	2000	-

U světlometu třídy E, musí být vybaven pouze výbojkovým zdrojem světla dle předpisu č. 99 [1].

Světlometry musí být provedeny tak, aby dávaly odpovídající osvětlení bez oslňování, jestliže vyzařují potkávací světlo a dobré osvětlení, jestliže vyzařují dálkové světlo [1].

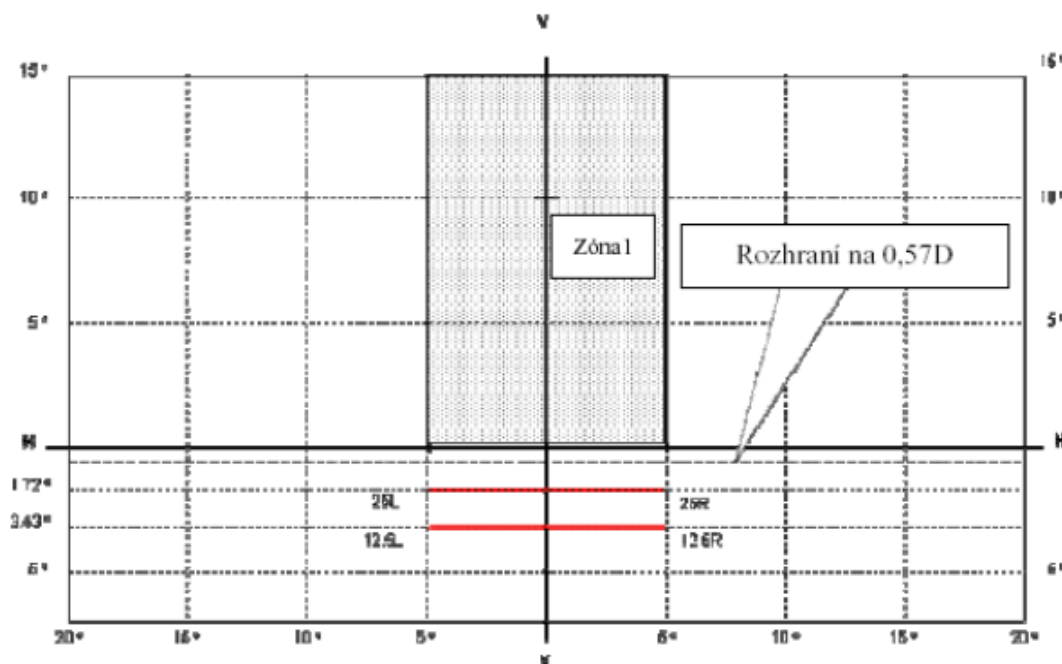
Svítivost světlometu se měří ve vzdálenosti 25 m pomocí fotoelektrického článku, který má užitečnou plochu uvnitř čtverce o straně 65 mm. Bod HV je střed systému souřadnic se svislou polární osou. Přímkou h je vodorovná, prochází bodem HV [1].

Během zkoušení světlometu musí světlometry třídy A, B, C, D mít nastavené napětí na svorkách takové, aby se dosáhlo referenčního světelného roku při 13,2V. U světlometu typu E, musí být zdroj zahořen minimálně 15 cyklů v souladu s předpisem č. 99 [1].

Potkávací světlo:

Pro správné zaměření musí potkávací světlo vytvářet dostatečně ostré rozhraní, aby dovolilo s jeho pomocí uspokojivé vizuální nastavení. Zaměření se musí provést s využitím rovné svislé stěny umístěné ve vzdálenosti 10 nebo 25 m před světlometem a v pravém úhlu k H-V. Stěna musí být dostatečně široká, aby dovolila vyšetřování a nastavení rozhraní potkávacího světla nejméně 3° na obě strany od přímky V-V. Rozhraní musí být v podstatě vodorovné a pokud možno přímé nejméně mezi 3° L až 3° R [1].

Seřízení vodorovné je tedy takové, když je světlo symetrické k V-V. Pro svislé seřízení, musíme opět mít vodorovnou část 0,57° pod přímkou H-H. Takto seřízený světlomet musí vyhovovat požadavkům. Tyto požadavky jsou specifické pro každou třídu světlometu. Ty jsou uvedené v předpise. Pro příklad jsou na obrázku 1.15. zobrazeny polohy zkušebních bodů pro světlomet třídy A [1].



Obr. 1.15 Poloha zkušebních bodů pro světlomet třídy A [1]

Každý bod musí mít své souřadnice a odpovídající svítivost v cd. To lze vidět v tabulce 1.8. Dovolená tolerance je $0,25^\circ$ nezávisle v každém bodě. Pro každou třídu světlometu jsou určité body a požadované svítivosti [1].

Tab. 1.8 Tabulka souřadnic a příslušných svítivosti pro světlomet třídy A[1]

Zkušební bod/přímka/pásmo	Úhlové souřadnice [°]		Požadovaná svítivost [cd]
Kterýkoliv bod v pásmu 1	0° až 15° U	5° L až 5° R	≤ 320 cd
Kterýkoliv bod na přímce 25L až 25R	$1,72^\circ$ D	5° L až 5° R	≥ 1100 cd
Kterýkoliv bod na přímce 12,5L až 12,5R	$3,43^\circ$ D	5° L až 5° R	≥ 550 cd

V případě, že takto seřízený světlomet nevyhovuje požadavkům, jeho seřízení může být změněno kromě světlometů, které nemají žádný mechanismus k nastavení horizontálního seřízení, za předpokladu, že osa světla se neposune o více než $0,5^\circ$ směrem doprava nebo doleva a svisle ne více než $0,25^\circ$ nahoru nebo dolů. Aby se seřízení pomocí rozhraní usnadnilo, může být světlomet částečně zakryt tak, aby rozhraní bylo zřetelnější. Rozhraní by nemělo zasahovat mimo přímku H-H [1].

Kvalita rozhraní

Pokud máme světlomet seřízený svisle, tedy $0,57^\circ$ pod přímkou H-H, nastává mnohdy problém, kdy seřízení vodorovné není možné. Je to případ, kdy není vodorovná část mezi 3° L a 3° R přímá, ale lehce zakřivená nebo skloněná. Dle tohoto předpisu, nesmí rozhraní překročit svislou

hranici tvořenou dvěma úsečkami mezi body 3°L, 3°R a protínající čáru V-V 0,2° pro třídu B a 0,3° pro třídy A, C, D a E nad, a pod jmenovitou polohou. To je tzv. linearita. Pokud tato podmínka není splněna, musí se provést zkouška pomocnou metodou [1].

Měření kvality provádíme svislým skenováním vodorovné části rozhraní v krocích po 0,05°. Měříme ve vzdálenosti 10 nebo 25 m s rozdílným průměrem čidla. Pro 10 m je průměr čidla přibližně 10 mm, pro 25m je průměr čidla přibližně 30mm. Měření kvality je přijatelné, pokud je viditelná pouze jedna čára rozhraní. Dalším důležitým parametrem je tzv. ostrost rozhraní (gradient). Činitel ostrosti je maximální hodnota naměřena ze svislého skenu ve vodorovné části čáry rozhraní mezi liniemi 2,5L a 2,5R. Činitel ostrosti G, nesmí být menší než 0,13 pro světlomet třídy B a 0,08 pro světlomet třídy A, C, D a E [1].

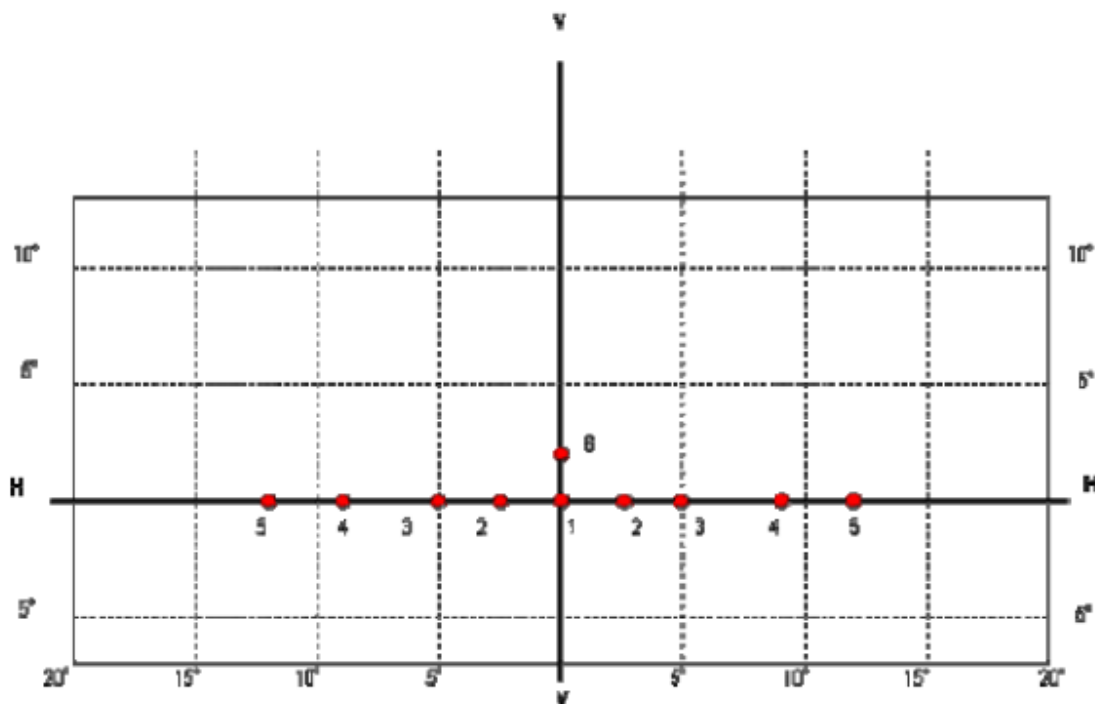
$$G = (\log E_V - \log E_{(V+0,1^\circ)}), \quad (1.1)$$

kde „v“ je svislá poloha ve stupních.

Dálkové světlo:

Jedná-li se o světlomet, konstruovaný pro dálkové i pro potkávací světlo, měření svítivosti dálkového světla se provede při stejném seřízení světlometu jako při potkávacího světla. Jedná-li se o světlomet jen pro dálkové světlo, seřídí se tak, aby oblast největší svítivosti byla soustředěna na průsečík přímek H-H a V-V. [1]

Kromě světlometu třídy A, musí ostatní třídy splňovat určité požadavky pro dálkové světlo. To znamená v určitém bodě dosáhnout požadované svítivosti. Souřadnice zkušebních bodů jsou tak jako u ostatních předpisů rozloženy na horizontále. To je zobrazeno například u obrázku 1.16. Požadované svítivosti pro hlavní dálkové světlo jsou v tabulce 1.9 [1].



Obr. 1.16 Rozložení měřicích bodů pro dálkové světlo[1]

Tab. 1.9 Tabulka požadovaných svítivostí pro hlavní dálkové světlo [1]

Číslo zkušebního bodu	Úhlové souřadnice zkušebního bodu [°]	Požadovaná svítivost [cd]					
		Třída B		Třída C		Třída D, E	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
1	H-V	16000	-	20000	-	30000	-
2	H-2,5°R a 2,5°L	9000	-	10000	-	20000	-
3	H-5°R a 5°L	2500	-	3500	-	5000	-
4	H-9°R a 9°L	-	-	2000	-	3400	-
5	H-12°R a 12°L	-	-	600	-	1000	-
6	2°U-V	-	-	1000	-	1700	-
	MIN svítivost maxima (I_M)	20000	-	25000	-	40000	-
	MAX svítivost maxima (I_M)		215000	-	215000	-	215000

Tolerance je opět 0,25° nezávisle v každém zkušebním bodě [1].

U světlometů s nastavitelným odražečem se dodatečné zkoušky provedou poté, co odražeč byl z jeho výchozí polohy pomocí zařízení pro nastavování světlometů vertikálně posunut o $\pm 2^\circ$ nebo nejméně do krajní polohy, je-li tato menší než 2° . Potom, se opět přenastaví světlomet jako celek (např. pomocí goniometru) pohybem o stejný počet stupňů do opačné polohy k pohybu odražeče. Musí být provedena následující měření a body musí být v požadovaných mezích: potkávací světlo: body HV a 0,86 D-V [1].

dálkové světlo: I_M a bod HV [1].

Barva

Barva vyzařovaného světla musí být bílá [1].

1.5. R123

Úplné znění předpisu: Jednotná ustanovení pro schvalování adaptivních systémů předních světlometů (AFS) motorových vozidel [1].

Tento předpis je asi ze všech nejzajímavější a dnes nejdůležitější. Je to proto, že popisuje dnes nejmodernější systémy světlometů. U tohoto předpisu si musíme jasně stanovit, co znamená adaptivní systém [1].

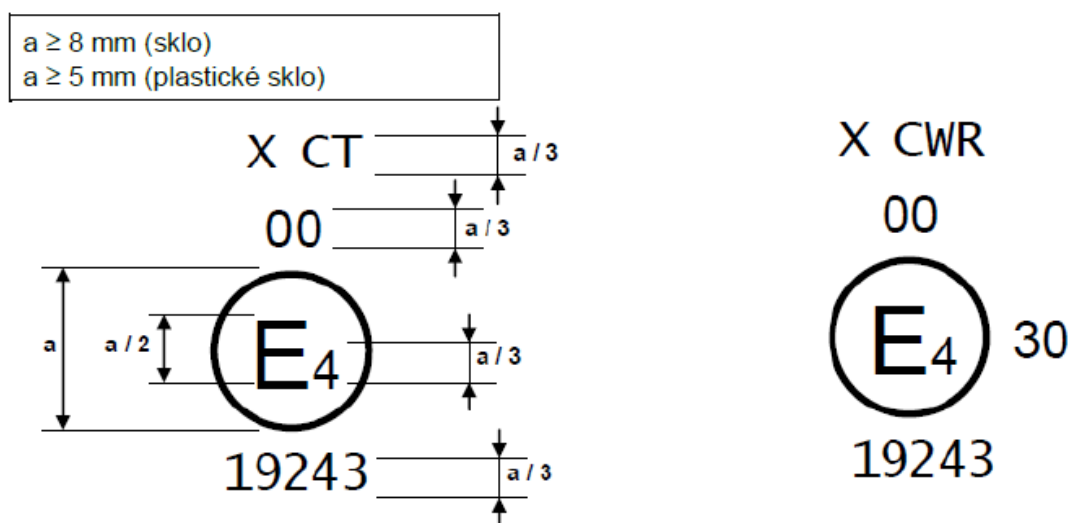
Adaptivní systém předního osvětlení vozovky“ (nebo “systém“) znamená světelné zařízení, které vozidlu zajišťuje osvětlení vozovky různých charakteristik pro automatické přizpůsobení osvětlení vozovky proměnným podmínkám na vozovce, a to použitím jak potkávacího světla a popřípadě i dálkového světla s minimálním funkčním obsahem. Takové systémy sestávají ze „systému ovládání“, jednoho nebo více případných „napájecích a spínacích zařízení“ a „montážních celků“ na pravé a levé straně vozidla [1].

Také je si třeba uvědomit, že takový systém dnes využívá více tzv. tříd. Třídy značíme písmeny C, V, E a W. Každá z nich má své fotometrické ustanovení dle tohoto předpisu, tedy R123 [1].

Tento předpis se vztahuje na adaptivní systémy předních světlometů (AFS) motorových vozidel kategorií M a N [1].

Značení

Samozřejmostí je u tohoto předpisu značení pravostranného a levostranného provozu. Pro pravostranný provoz je to R/D a pro levostranný L/G. Dále u AFS světlometů s LED modulem, je třeba mít označení pro jmenovité napětí, příkon a modul zdroje. Modul je pak označen značkou MD. Sestava značky je pak opět písmeno „E“ v kružnici, za tímto písmenem pak číslo státu. Dále písmenem „X“ pro funkci, která je zajišťována systémem, a to C, E, V a W pro potkávací světla a R pro světla dálková. Příklad takové značky je na obrázku 1.17 [1].



Obr. 1.17 Příklad homologační značky dle předpisu R123 [1]

Montážní celek systému, opatřený jednou z výše uvedených značek schválení, byl schválen v Nizozemsku (E4) dle tohoto předpisu pod číslem schválení 19243, vyhovující požadavkům série změn 01 tohoto předpisu. Potkávací světlo je konstruováno pouze pro pravostranný provoz. Písmena „CT“ udávají, že se jedná o potkávací světlo s módem do zatáčky a písmena „CWR“ udávají, že se jedná o potkávací světlo třídy C a třídy W potkávacího světla a dálkové světlo. Číslo 30 udává, že maximální svítivost dálkového světla je v rozmezí od 123 625 do 145 125 cd [1].

Osvětlení

Systém musí být vybaven jedním nebo kombinací zdrojů světla, které jsou schváleny podle předpisu č. 37 a jeho sérií změn platných v době žádosti o schválení typu a/nebo pro který neplatí žádné omezení v použití [1].

Také zdroje světla schválené předpisem č. 99 a LED moduly [1].

U systémů, které mohou střídavě měnit funkci dálkovou a potkávací, je nutné, aby bylo zařízení robustní a odolalo 50 000 cyklů [1].

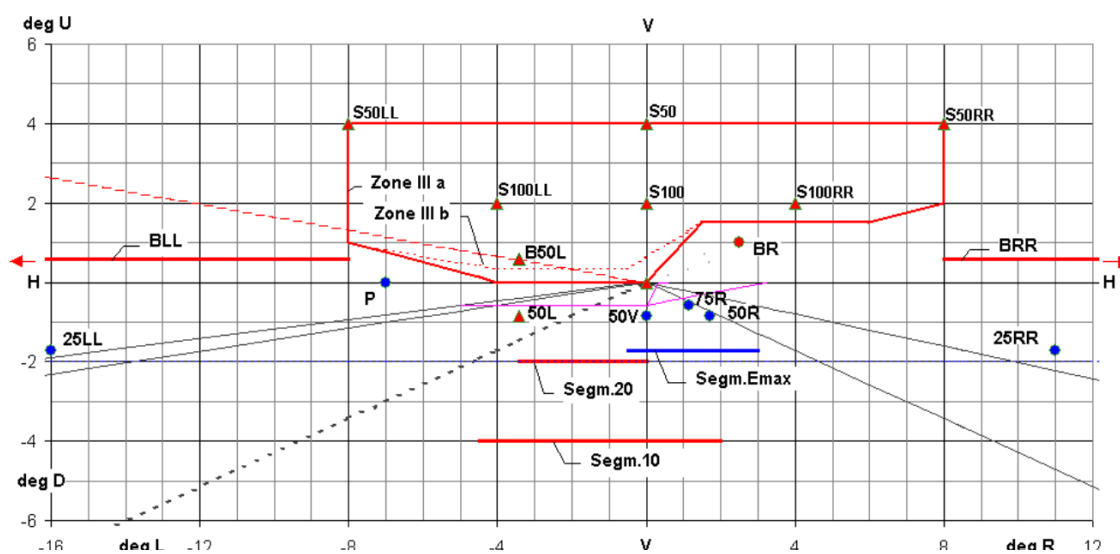
Každý systém musí poskytovat potkávací světlo třídy C a jedno nebo více potkávacích světél dodatečné třídy (tříd). Může zahrnovat jeden nebo více doplňkových módů v každé třídě potkávacího světla a funkce předního osvětlení vozovky podle tohoto předpisu [1].

Systém musí zajistit automaticky takové změny, že je dosaženo dobré osvětlení vozovky a není způsobeno oslnění ani řidiči, ani ostatním uživatelům vozovky [1].

Potkávací světlo:

Před každými zkušebními postupy je třeba, aby systém byl nastaven do neutrálního stavu, a to do třídy C. V tomto stavu musí vytvářet rozhraní, jako je popsáno v předešlých předpisech v kapitole

1.2 osvětlení a na obrázku 1.7. V tomto stavu je nadále důležité splnit všechny fotometrické body, zobrazeny na obrázku 1.18 [1].



Obr. 1.18 Úhlové polohy fotometrických požadavků potkávacího světla [1]

Dle tabulky v příloze tohoto předpisu je nutno splnit všechny body, a to v příslušném oddílu, např. C, V, E, W. Ukázka této tabulky je na obrázku 1.19 [1].

Tabulka 1: Fotometrické požadavky potkávacího světla

Požadavky v tabulce vyjádřeny v cd		Poloha / stupeň			potkáv			
		vodorovná		svislá	třída C		třída V	
č.	Element	v/ od	do	v	min	max	min	max
Část A	1 B50L	L 3,43		U 0,57	50 4/	350	50	350
	2 HV	V		H	50 4/	625	50	625
	3 BR	R 2,5		U 1	50 4/	1 750	50	880
	4 Segment BRR	R 8	R 20	U 0,57	50 4/	3 550		880
	5 Segment BLL	L 8	L 20	U 0,57	50 4/	625		880
	6 P	L 7		H	63			
	7 Zóna III podle tab. 3 této přílohy					625		625
	8a S50+S50LL+S50RR 5/			U 4	190 6/			
	9a S100+S100LL+S100RR 5/			U 2	375 6/			
	10 50R	R 1,72		D 0,86			5 100	
	11 75R	R 1,13		D 0,57	10 100			
	12 50V	V		D 0,86	5 100		5 100	
	13 50L	L 3,43		D 0,86	3 550	13 200 8/	3 550	13 200 8/
	14 23LL	L 16		D 1,72	1 180		845	
	15 25RR	R 11		D 1,72	1 180		845	
	16 Segment 20 a pod ním	L 3,5	V	D 2				
	17 Segment 10 a pod ním	L 4,5	R 2,0	D 4		12 300 1		12 300 1
	18 I _{max} 3/				16 900	44 100	8 400	44 100
Část B (módy do zatáčky): Použije se tabulka 1 část A, avšak s řádky 1, 2, 7, 13 a 18 nahrazených níže uvedenými								
Část B	1 B50L	L 3,43		U 0,57	50 4/	530		530
	2 HV				50 4/	880		880
	7 Zóna III podle tab. 3 této přílohy					880		880
	13 50L	L 3,43		D 0,86	1 700		1 700	
	18 I _{max}				10 100	44 100	5 100	44 100

Obr. 1.19 Ukázka (část) tabulky v příloze předpisu R123 – fotometrické požadavky potkávacího světla [1]

Kvalita rozhraní

Svislé nastavení nemůže být provedeno opakovaně do požadované polohy uvnitř tolerancí uvedených v kapitole 1.2 osvětlení. V tomto případě provedeme zkoušku pomocnou metodou pro kvalitu rozhraní, která je popsána v kapitole 1.4, a k vykonání svislého a vodorovného nastavení světla [1].

Linearita v tomto předpise znamená:

Vodorovná část „rozhraní“, která slouží pro svislé nastavení, musí být vodorovná mezi 1,5° a 3,5° od přímky V-V [1].

(a) Inflexní body gradientu „rozhraní“ na svislých přímkách v bodech 1,5°, 2,5° a 3,5° jsou určeny rovnicí:

$$\frac{d^2(\log E)}{d\beta^2} = 0 \quad (1.2.)$$

(b) Maximální svislá vzdálenost mezi inflexními body nesmí překročit 0,2° [1].

Jestliže plníme požadavky rozhraní, můžeme svisle nastavit svazek pomocnou metodou. Sken je proveden vodorovnou částí rozhraní ve $2,5^\circ$ od V-V. Inflexní bod pak je na přímce B 1% pod H-H [1].

U vodorovného nastavení máme metodu „přímky $0,2 D^\circ$ “, kdy na přímce v poloze $0,2^\circ$ pod H-H skenujeme v $5^\circ L$ a $5^\circ R$ a „metodu 3 přímek“, která spočívá ve skenu od -2° do 2° v bodech $1^\circ R$, $2^\circ R$, $3^\circ R$ [1].

Dálkové světlo:

Před každými zkušebními postupy je třeba, aby systém byl opět nastaven do neutrálního stavu. Plocha největšího osvětlení musí být soustředěna na bod HV [1].

Pro dálková světla máme opět rozdílné hodnoty měřících bodů, svítivosti [1].

Tab. 1.10 Požadavky pro dálkové světlo [1]

Zkušební bod	Úhlové souřadnice $[\circ]$	Požadovaná svítivost [cd]
		min
I_M		40500
H-5L	0.0, 5.0 L	5100
H-2.5L	0.0, 2.5 L	20300
H-2.5L	0.0, 2.5 R	20300
H-5R	0.0, 5.0 R	5100

Průsečík HV přímek h-h a v-v musí být uvnitř izoluxy, která představuje 80 % maximální svítivosti dálkového světla [1].

Tato maximální hodnota nesmí v žádném případě překročit 215 000 cd [1].

Jestliže specifické požadavky na světlo nejsou splněny, nové zaměření polohy světla v rozsahu $0,5^\circ$ nahoru nebo dolů a/nebo 1° vpravo nebo vlevo vzhledem k jeho výchozímu zaměření je dovoleno; v nové revidované poloze musejí být splněny všechny fotometrické požadavky. Tato ustanovení se neaplikují na celky k osvětlení vozovky dle tohoto předpisu [1].

Během adaptace musí funkce dálkového světla splňovat požadavky pro všechny případy pravostranného a levostranného provozu specifikovaného v tabulce v příloze tohoto předpisu. Tyto požadavky se musí ověřit během zkoušek schválení typu ve spojení se signálním generátorem, který poskytne žadatel. Tento signální generátor vytváří signály poskytované vozidlem a vyvolá adaptaci dálkového světla, a zvláště musí představovat nastavení tak, že vyhovění fotometrie může být ověřeno [1].

Část A	Zkušební bod	Poloha / ° (stupně)		Maxim. svítivost **/ [cd]
		Horizontální	Vertikální	
	čára 1 vlevo vozidlo v protisměru 50m, pro pravostranný provoz	4,8°L až 2°L	0,57°Up	625
	čára 1 vpravo vozidlo v protisměru 50m, pro levostranný provoz	2°R až 4,8°R	0,57°Up	625
	čára 2 vlevo vozidlo v protisměru 100m, pro pravostranný provoz	2,4°L až 1°L	0,3°Up	1 750
	čára 2 vpravo vozidlo v protisměru 100m, pro levostranný provoz	1°R až 2,4°R	0,3°Up	1 750
	čára 3 vlevo vozidlo v protisměru 200m, pro pravostranný provoz	1,2°L až 0,5°L	0,15°Up	5 450
	čára 3 vpravo vozidlo v protisměru 200m, pro levostranný provoz	0,5°R až 1,2°R	0,15°Up	5 450
	čára 4 vozidlo vpředu 50m, pro pravostranný provoz	1,7°L až 1,0°R	0,3°Up	1 850
		>1,0°R až 1,7°R		2 500
	čára 4 vozidlo vpředu 50m, pro levostranný provoz	1,7°R až 1,0°L		1 850
		>1,0°L až 1,7°L		2 500
	čára 5 vozidlo vpředu 100m, pro pravostranný provoz	0,9°L až 0,5°R	0,15°Up	5 300
		>0,5°R až 0,9°R		7 000
	čára 5 vozidlo vpředu 100m, pro levostranný provoz	0,9°R až 0,5°L		5 300
		>0,5°L až 0,9°L		7 000
	čára 6			

Obr. 1.20 Ukázka (část) tabulky v příloze předpisu R123 – adaptace dálkového světla [1]

Barva

Barva vyzářovaného světla musí být bílá [1].

2. Světelné zdroje použitelné ve světlometech

Ve světlometech, a hlavně tedy pak v projektorech používáme tři nejpoužívanější světelné zdroje. Jsou to halogenové žárovky, xenonové výbojky a LED diody. Nejprve je třeba znát světelné technické parametry.

2.1. Světelné technické parametry

Světelný tok

Veličina, která nám říká, kolik světelné energie vyzáří světelný zdroj do svého okolí. Je to zářivý tok, za podmínek fotopického vidění, které zpracovává oko. Jednotkou je lumen (lm) a značí se Φ [8].

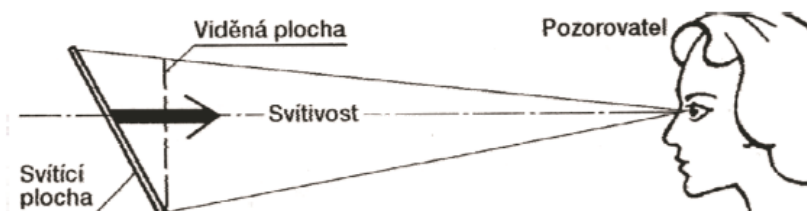
Prostorový úhel

Prostorový úhel je část prostoru na kouli o poloměru r a ploše A , který je vymezena kuželovou plochou, jejíž vrchol je zároveň středem dané koule. Jednotka je steradián (sr) a značí se Ω . Definice 1 sr je kužel, který vytvoří plochu o velikosti 1 m^2 na kouli o poloměru 1 m [8].

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ [sr]} \quad (2.1)$$

Jas

Jas je veličina, na kterou reaguje naše oko, resp. na jeho kontrast. Nezáleží na tom, jestli je jas pozorován přímo ze zdroje nebo odražené od libovolné plochy. Důležitá je poloha pozorovatele a směr jeho pohledu [8].



Obr. 2.1 Definice jasu [8]

Jednotkou je kandela na metr čtvereční ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) a značí se L [8].

Měrný výkon

Důležitý parametr všech světelných zdrojů je měrný výkon, který vyjadřuje účinnost daného zdroje. Čím větší je měrný výkon, tím efektivnější je energie přeměněná z elektrické na světelnou. Je to tedy poměr elektrického příkonu P_1 a světelného toku Φ [8].

$$\eta_p = \frac{\Phi}{P_1} \text{ [lm} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.2)$$

U dnešních LED diod se pohybuje měrný výkon kolem 150 lm/W [8].

Svítivost

Jedna z nejdůležitějších veličin v oblasti návrhu světlometů. Svítivost je dána jako podíl světelného toku a prostorového úhlu. Je to tedy hustota světelného toku v určitém směru. A to je právě jedna z veličin, která figuruje ve všech legislativních předpisech. Jednotkou je kandela (cd) a značí se I [8].

Intenzita osvětlení

Osvětlenost je podíl světelného toku dopadající na určitou plochu. Jedná se o další důležitou veličinu. Jednotkou je lux (lx) a značí se E [8].

$$E = \frac{\Phi}{A} \text{ [lx]} \quad (2.3)$$

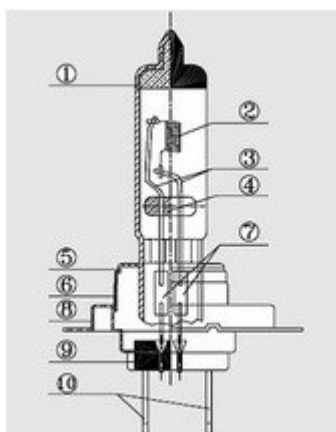
$$E = \frac{l}{r^2} \cos \alpha \text{ [lx]} \quad (2.4)$$

2.2. Halogenová žárovka

V oblasti automobilového osvětlení je halogenová žárovka nejstarším světelným zdrojem, doposud hodně používaným. Halogenová žárovka se skládá z baňky, vyrobené z tvrdého skla. To umožňuje v baňce mít větší tlak a teplotu. Uvnitř baňky jsou směsi inertních plynů s příměsí halových prvků. Výhodou halogenové žárovky je okamžitý start, malý úbytek svítivosti na konci životnosti a hlavně cena, díky které byl tento světelný zdroj nejčastějším zdrojem v oblasti světlometů. Další podstatnou výhodou je jednoduchost, výměna. Nevýhodou je však menší světelný výkon. Halogenové žárovky jsou také hodně používané u bifunkčních projektorů a časté zapínání nebo vypínání jednotlivých funkcí zkracuje jejich dobu životnosti. [15]

Nejčastěji používané žárovky pro přední světlometry jsou H7, H11, HB3, HB4, HIR1, HIR2.

Konstrukce halogenové žárovky H7

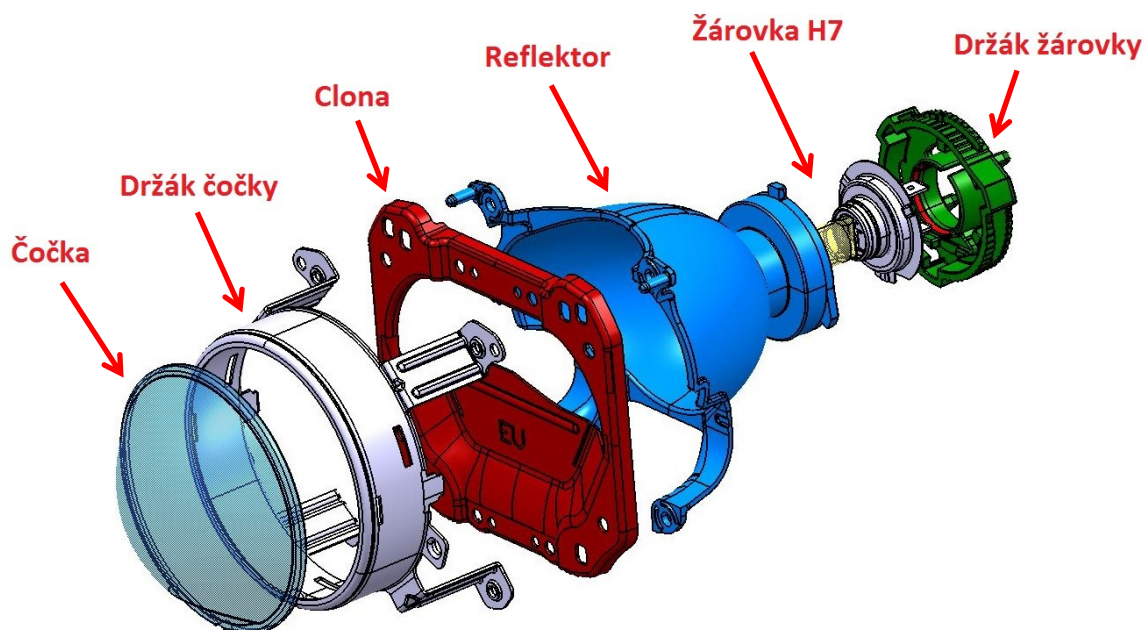


1. Baňka žárovky z křemenného skla
2. Žhavicí vlákno
3. Žhavicí drát
4. Tyčka
5. Adaptér
6. Nastavovací kroužek
7. Kovová fólie
8. Uzavírací krytka
9. Bakelit (umělá pryskyřice odolná vůči vysokým teplotám)

Obr. 2.2 Konstrukce halogenové žárovky H7 [2]

Parametry halogenové žárovky

Příkon	55-65 W
Měrný světelný výkon	26 lm. W ⁻¹
Teplota chromatičnosti	2900–3100 K
Světelný tok	1500-2000 lm
Životnost žárovky	400-550 hod. [4]



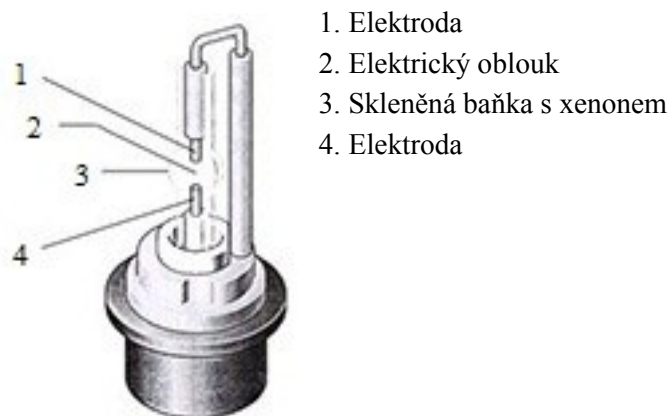
Obr. 2.3 Příklad konstrukčního řešení halogenového projektoru

2.3. Xenonová výbojka

HID (High-Intensity Discharge) neboli xenonová výbojka byla donedávna považována jako nejvyšší stupeň výbavy v automobilových světlometech. Principem této výbojky je řízený výboj v plynu, v našem případě xenonu, mezi dvěma elektrodami, které se nachází v trubici, vyrobené z čistého křemičitého skla. K výboji dochází při napětí mezi 18000-30000 V. Požadovaný vysokonapěťový impuls nám zajistí tzv. Ballast, což je měnič stejnosměrného napětí na napětí střídavé o frekvenci 300 Hz. Výhodou xenonové výbojky je mnohem vyšší světelný tok než u halogenové žárovky, lepší podání barev blíží se k dennímu světlu a několikanásobně delší životnost než u halogenové žárovky. Nevýhodou je použití elektroniky a zároveň i cena. Další velkou nevýhodou je nutnost použití elektronické regulace sklonu světlometu a ošťikovačů, jelikož světelný tok překračuje hodnotu 2000 lm. [15]

Nejčastěji používané žárovky pro přední světlometry jsou D1S, D3S, D8S pro projektory a pro reflektorové verze to jsou D1R, D2R.

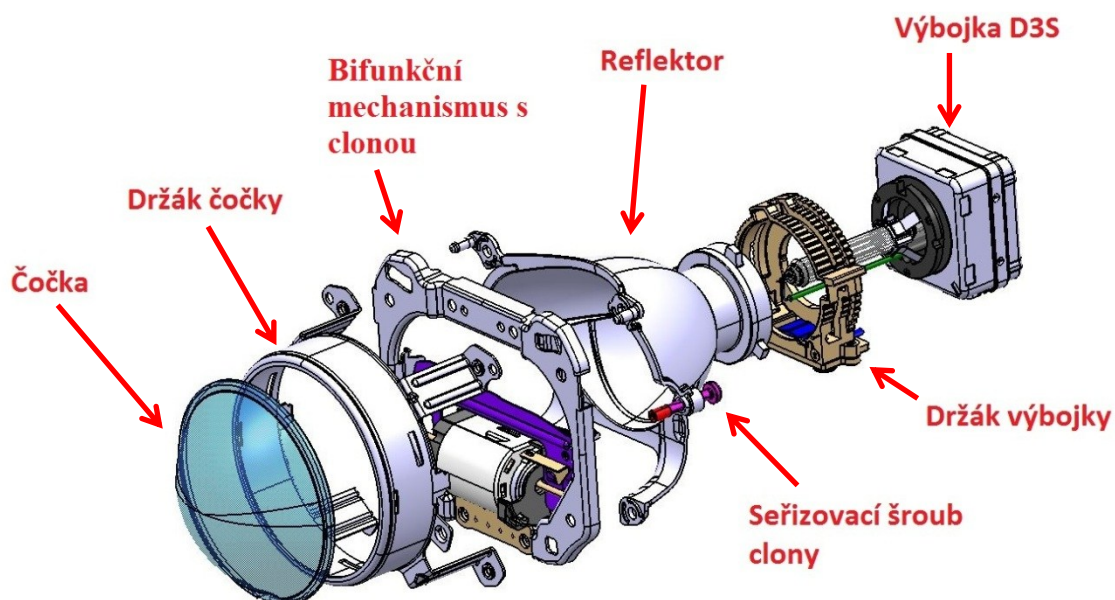
Konstrukce xenonové výbojky



Obr. 2.4 Konstrukce xenonové výbojky [3]

Parametry halogenové žárovky

Příkon	25-35 W
Měrný světelný výkon	80-89 lm. W ⁻¹
Teplota chromatičnosti	4000-4250 K
Světelný tok	1600-3500 lm
Životnost žárovky	1500-3000 hod. [4]



Obr. 2.5 Příklad konstrukčního řešení xenonového projektoru

2.4. LED dioda

Nejoblíbenějším a zároveň dnes i nejpoužívanějším zdrojem světla je LED dioda. V automobilovém průmyslu je dnes LED dioda použita snad v každém světlometu a jsou jich velké množství. Například i samostatný projektor dnes obsahuje několik desítek LED diod. Proto si myslím, že LED diody si v této práci zaslouhují větší pozornosti.

Výhoda LED diody je životnost, rychlá odezva, nízký příkon, velikost, váha a také teplota chromatičnosti, která může dosahovat kvality až denního světla. Další výhodou je jednoduchá regulace jasu pomocí proudu. Největší nevýhodou u LED zdrojů je jejich teplotní závislost. V automobilovém průmyslu se snad každý výrobce potýká s tímto problémem. LED diody produkují také kromě světelného záření i velké množství tepla, které zkracuje jejich životnost a snižuje světelný tok. Abychom tyto dva parametry udrželi na konstantní hodnotě, je nutno použít objemné chladiče z hliníku a dobrou cirkulaci vzduchu v celém světlometu. S požadavky zákazníků roste počet LED zdrojů ve světlometu a jejich funkce. To znamená spousta elektroniky navíc se srovnáním například s žárovkami. [4]

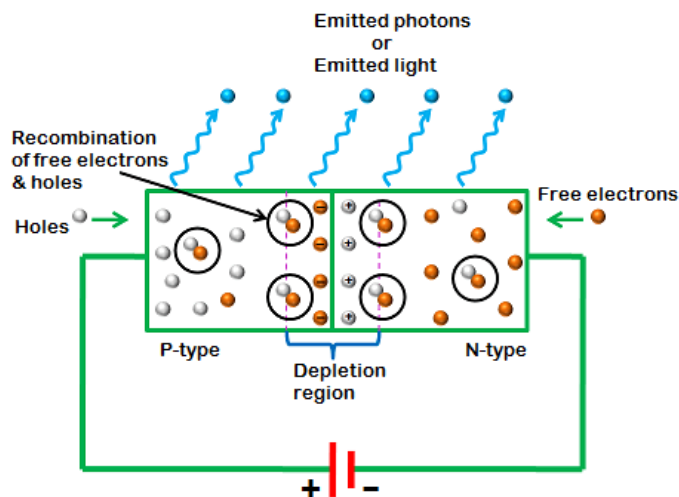
LED dioda je založena na PN přechodu, který při průchodu proudu vyzařuje světlo o určité vlnové délce. PN přechod je složen z nevlastního polovodiče typu P a N.

Polovodič typu N je např. čtyřmocný prvek křemíku, který je obohacen prvkem s pěti valenčními elektrony. Pátý elektron je k atomu sice vázán, ale slabě. Znamená to tedy, že pokud atomu dodáme i velmi malou energii, nadbytečný elektron se uvolní – elektronová vodivost. Jelikož je elektron přidán, nazýváme atom donorem [16].

U polovodiče typu P si uvedeme stejný příklad se čtyřmocným prvkem křemíku, který byl ale obohacen prvkem pouze se třemi valenčními elektrony. Chybějící atom nazýváme dírou – děrová vodivost. Při malém množství energie, může díra přijímat elektrony. Atom s chybějícím elektronem nazýváme akceptor [16].

Spojením těchto dvou polovodičů vznikne PN přechod.

PN přechod je rozhraní na kterém vznikne tzv. vyprázdněná oblast, která neobsahuje žádné elektrony ani díry. Jakmile připojíme polovodič typu P ke kladnému pólu elektrického zdroje a záporný pól k polovodiči typu N, vyprázdněná oblast se zúží a majoritní nosiče tuto oblast překonají a dostávají se do druhého typu polovodiče, kde se stanou nosiči minoritními. Při tomto nerovnovážném stavu vzniká tzv. rekombinace elektronů s děrami. Díky rekombinaci se při „přeskoku“ elektronů přes zakázané pásmo, mění jejich energie na záření. V opačném případě zapojení, v závěrném směru, se vyprázdněná oblast rozšíří, až dojde k přerušení přechodu nábojů [16].



Obr. 2.6 Princip LED diody [5]

Nejvíce světla je vyzařováno blíže polovodiči typu P, takže je důležité, aby při konstrukci byl polovodič typu P blíže povrchu LED diody.

Použitím různých materiálů, dostaneme různou šířku zakázané (vyprázdněné) oblasti. Rozdílná šířka této oblasti určuje vlnovou délku záření. U každé velikosti vyprázdněné oblasti potřebuje elektron rozdílně velkou energii [14].

Tab. 2.1 Příklady materiálů a barev světla[14]

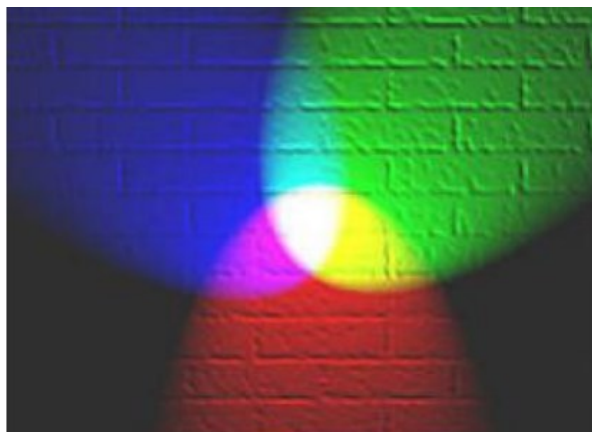
Materiál	Barva světla	λ/nm
SiC, GaN	Modrá barva	450
GaP, GaAs	Zelená barva	565
GaPZnO	Červená barva	635
SiC, GaN, (luminofor)	Bílá barva	450-650
GaAsSi	Infračervené záření	820-950

Vznik bílého světla

U automobilových světlometů, resp. předních projektorů, používáme pouze bílé světlo. Bílé světlo můžeme vytvořit kombinací základních barev RGB, či nanesení luminoforu na diodu.

RGB princip vzniku bílého světla

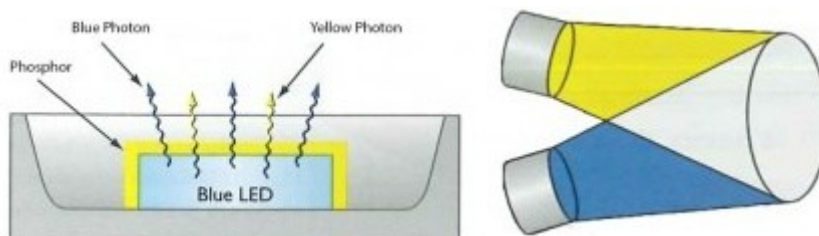
Z názvu je patrné, že se jedná o základní barvy, červená, zelená a modrá. Jsou to tedy tři samostatné LED diody, jejichž kombinací vytvoříme bílé světlo. Tato metoda je zastaralá, a ne velice efektivní. Bílá barva není stálá vlivem změny teploty LED diod. Navíc použití tří LED diod je značně neekonomické a v automobilovém průmyslu i velice náročné na prostor [6].



Obr. 2.7 Bílé světlo smícháním tří barev [6]

Použití luminoforu

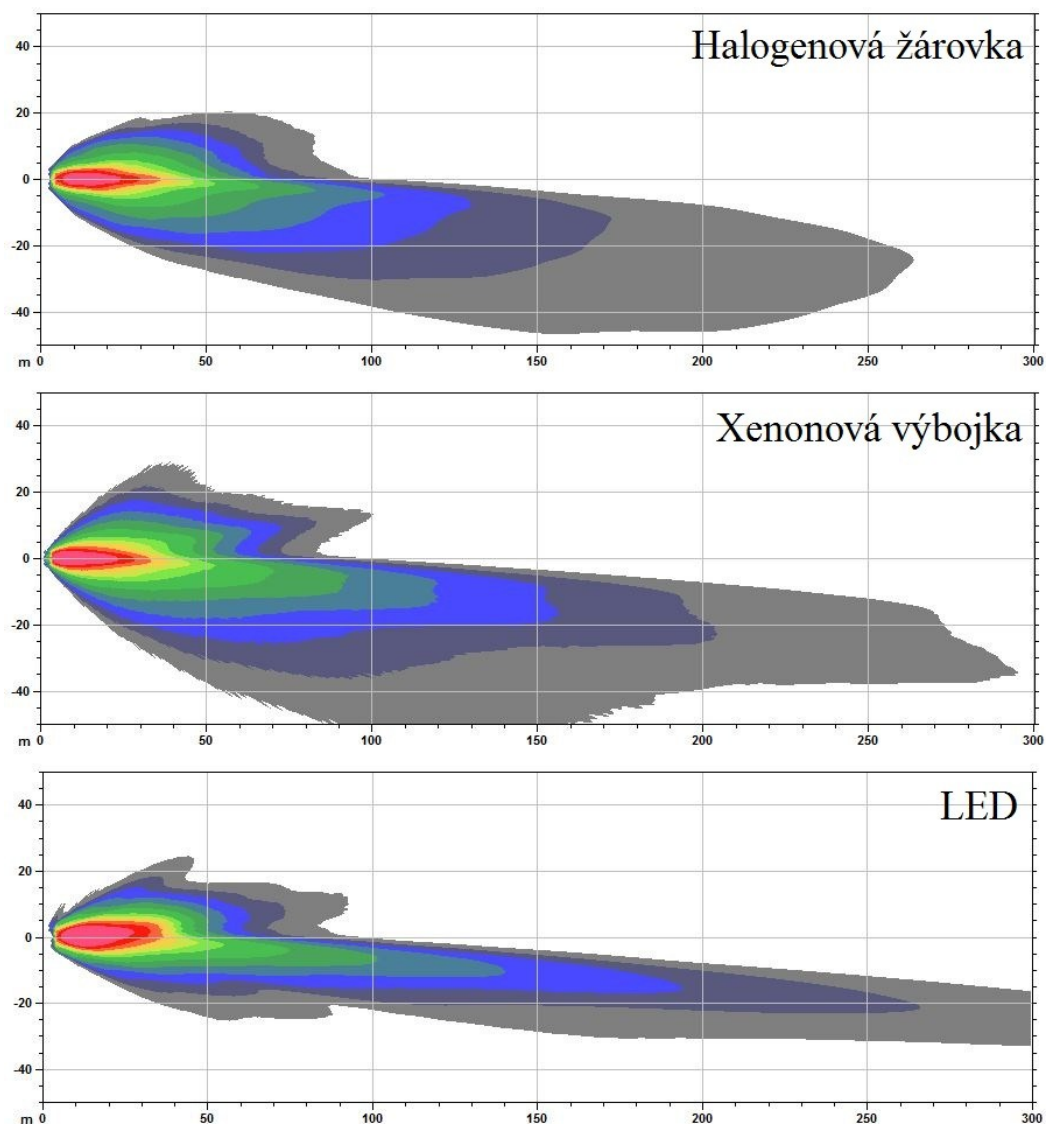
Tato metoda je použita u všech LED diod v automobilovém průmyslu. Dá se říci, že tato metoda je i jediná. Luminofor je látka, která je schopna pohlcovat energii a následně vyzářit ve formě světla. Použitím luminoforu myslíme kombinaci krátkovlnné LED diody, např. modrá, a pláštěm z luminoforu. Modré světlo se vlivem luminoforu přemění na světlo bílé nebo projde beze změny, modré. Kombinací modré a žluté barvy vyzařuje LED dioda bílé světlo [6].



Obr. 2.8 Princip luminoforu a tvorba bílého světla [6]

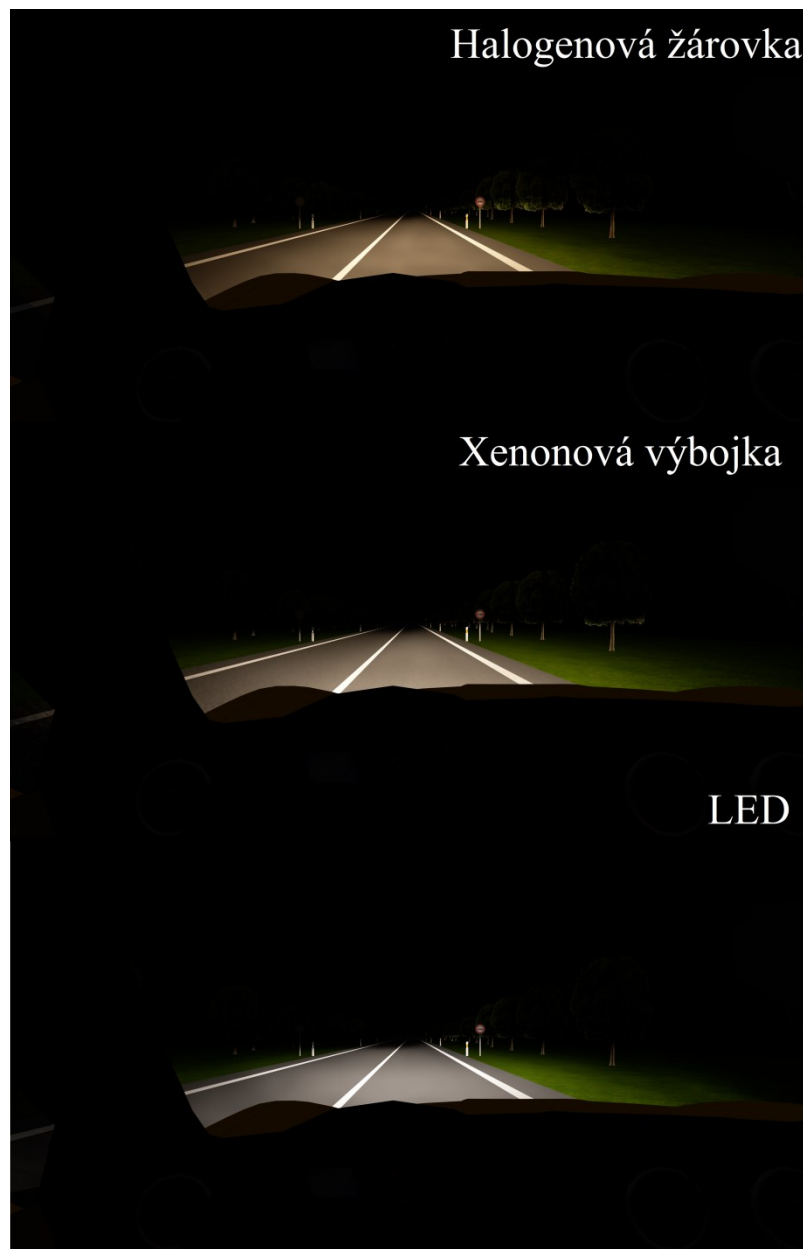
2.5. Porovnání výstupních svazků použitím různých světelných zdrojů

V této části jsou porovnány projektory s použitím rozdílných světelných zdrojů. U halogenového projektoru je použita žárovka H7, u xenonového projektoru výbojka D3S a u LED projektoru Altilon se dvěma čipy od firmy Lumileds.



Obr. 2.9 Příklad fotometrických map jednotlivých projektorů s použitím odlišných světelných zdrojů

Na obrázku 2.9 jsou zobrazeny fotometrické mapy jednotlivých projektorů. Vertikální osa znázorňuje úhlové souřadnice a horizontální osa vzdálenost v metrech. U srovnání těchto map nemůžeme například vyhodnocovat rozptyl svazku apod., protože to závisí na designu a požadavcích zákazníka. Co je ale z fotometrických map ihned patrné, je dosah. Fotometrické mapy jsou rozdělené dle intenzity osvětlení (v luxech) dle barev. Za viditelnou intenzitu považujeme 1 lx, což představuje tmavě modrá barva. Při porovnání těchto intenzit vidíme, že dosah halogenové žárovky je cca 125 m, xenonové výbojky 150 m a u LED zdroje je to téměř 200 m.



Obr. 2.10 Příklad porovnání jednotlivých projektorů v simulačních SW

Na obrázku 2.10 můžeme vidět tyto svazky simulované na běžné cestě v simulačním programu. Z tohoto obrázku je patrná rozdílná teplota chromatičnosti. V našem případě, má halogenová žárovka teplotu chromatičnosti 3600 K, xenonová výbojka 4300 K a LED dioda 5300 K. Lze si všimnout, že pro člověka je daleko příjemnější světlo s LED diodou, u které se teplota chromatičnosti blíží k dennímu světlu. Různé objekty jsou výraznější a umožňují řidiči lépe vnímat osvětlený prostor. V porovnání například s halogenovou žárovkou.

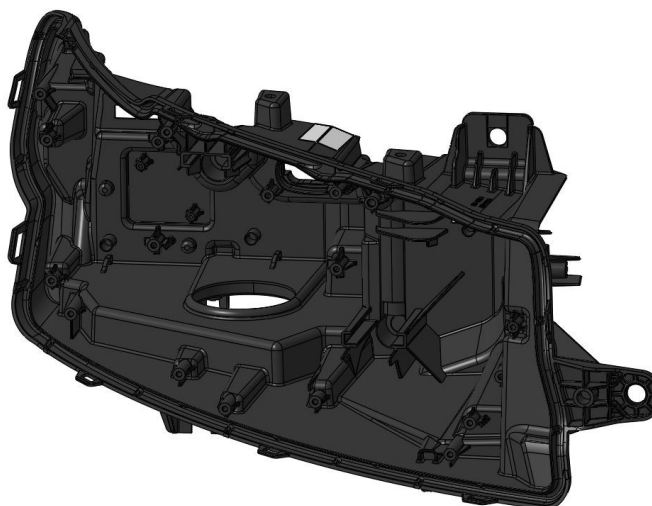
3. Struktura a rozdělení světlometů

3.1. Struktura světlometů

Každý světlomet je velmi specifický ať už podle požadavků zákazníka tak z hlediska výrobitelnosti. Většinou je tomu právě tak, že výroba světlometu začíná designem zákazníka a poté se na „míru“ navrhuje řešení dodavatelem do tohoto designu. V této kapitole bude pro příklad struktura světlometu Ford Lincoln, o jehož projektorech je tato diplomová práce. Vše bude popsáno tak, abych co nejlépe nastínil strukturu tohoto světlometu, ale abych také nenarušil vlastnictví firmy FORD.

Pokud pomineme všechny upevňovací prvky, jako jsou šrouby apod., začneme pouzdrem.

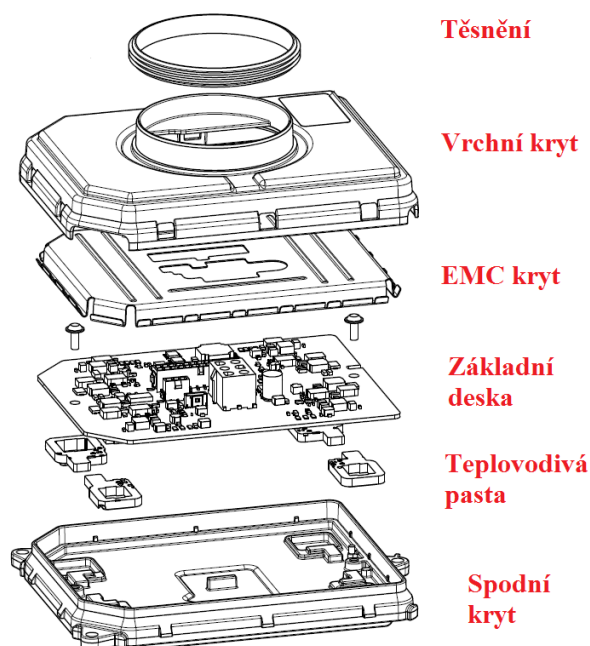
Pouzdro (označováno jako housing) je vyrobeno z polypropylenu (PP). Do pouzdra následně vkládáme ostatní komponenty světlometu, jako například samotné projektory, seřizovací prvky, kabeláž apod.



Obr. 3.1 Polypropylenové pouzdro

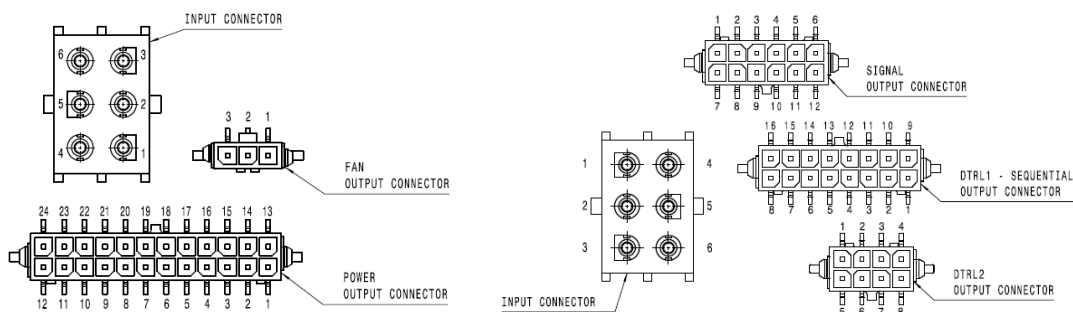
Právě seřizovací a uchycovací prvky jsou důležité proto, abychom mohli projektory správně nastavit, a také nám umožňují přizpůsobit světlomet při jízdě, abychom neoslňovali například při plně naloženém kufu. Hlavní seřizovací prvek je vybaven krokovým motorkem. Každý světlomet musí být správně odvětrán a nesmí do sebe dostat žádnou vlhkost. K tomu slouží goro membrány.

Dalším důležitým prvkem jsou řídicí jednotky pro hlavní a signální funkce světlometu tzv. LED driver moduly (LDM). Tyto jednotky dodává zákazník a povinností dodavatele světlometu je, se na tuto jednotku přizpůsobit. LDM je opatřena vrchním a spodním krytem, uvnitř je základní deska, na které je dále EMC kryt.



Obr. 3.2 Struktura LDM

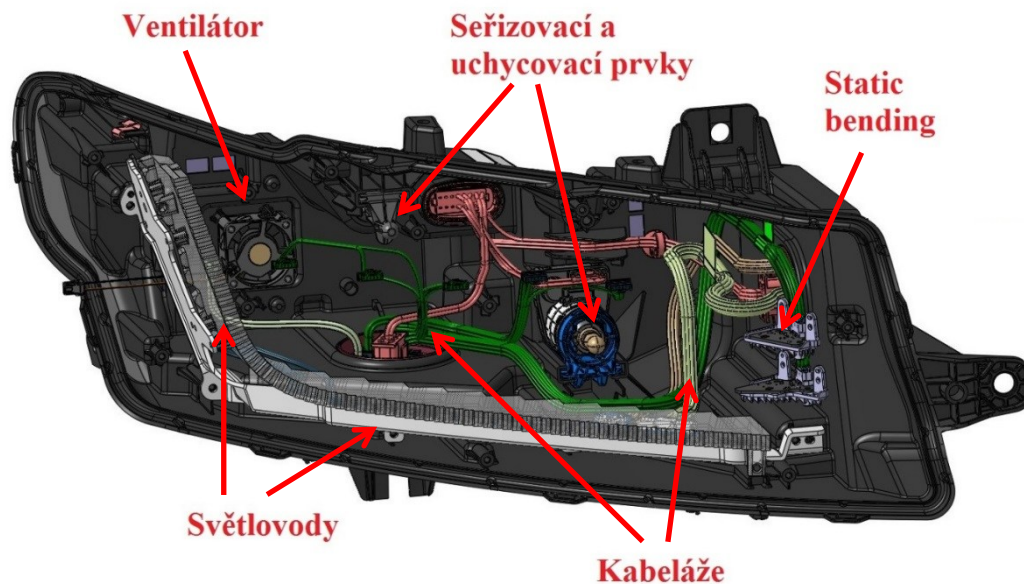
Jak již bylo zmíněno, LDM jsou ve světlometu dva. Jedna je pro hlavní funkce, jako je potkávací, dálkové světlo a svícení do zatáček. Druhá LDM ovládá signální funkce a denní svícení, tzv. DRL.



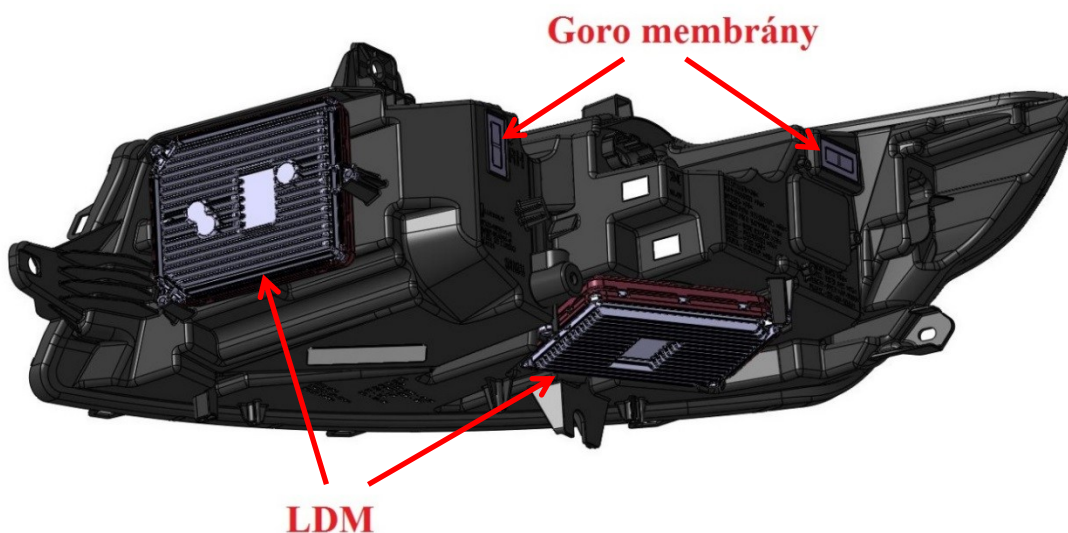
Obr. 3.3 Připojení LDM. Vlevo LDM pro hlavní funkce, vpravo pro signální funkce a DRL

U každé z LDM můžeme vidět na obrázku 3.3, že máme jeden vstupní konektor, který slouží ke komunikaci LDM s vozidlem pomocí LIN. Pro hlavní funkce má LDM 3pinový konektor pro ventilátor a 24pinový konektor. Tento konektor je rozdělen po 6 pinech. Tedy pro čtyři funkce – potkávací, dálková a svícení do zatáček, které je rozděleno na vrchní a spodní. LDM pro signální funkce a DRL je rozdílná v tom, že má každý konektor zvlášť pro svou funkci. Pro horizontální a vertikální DRL a signální funkce.

Dostáváme se k samotnému optickému systému. Na obrázku 3.4 lze vidět horizontální a vertikální světlovody pro denní svícení a signální funkce. Dále je ve schránce malý modul, který se skládá z chladiče a desky plošných spojů, osazenou duálním čipem LED Oslon Black Flat od firmy OSRAM. Samozřejmostí je reflektor. Tento modul slouží k lepší viditelnosti do zatáček. Zde je rozdělen, jak už bylo zmíněno, na vrchní a spodní. Modul je taktéž nazýván static bending.



Obr. 3.4 Popis komponentů v polypropylenovém pouzdře



Obr. 3.5 Zadní strana polypropylenového pouzdra

A projektorový modul, který je popsán v kapitole 5.



Obr. 3.6 Projektorový modul v polypropylenovém pouzdře

Nakonec, z designového hlediska se do světlometu přidávají krycí a designové plastové díly, které nám zakrývají části světlometu, které nechceme ukazovat, a celkově lampě dodají lepší design.



Obr. 3.7 Kompletní lampa bez vnějšího skla, včetně krycích a designových plastových dílů

Poslední částí je krycí sklo z polykarbonátu (PC).



Obr. 3.8 Světlomet Ford Lincoln [8]

3.2. Rozdělení světlometů dle optických systémů

Světlometry můžeme dnes rozdělit podle optických systémů. Ty základní, nejpoužívanější světlometry jsou buď reflektorové, tedy parabola, která tvoří v podstatě celý světlomet, nebo projektor. Světlometry obsahující projektor jsou buď vybaveny pouze projektorem a funkcemi jako jsou denní svícení, signální funkce apod., nebo projektorem, který tvoří jednu z hlavních funkcí výstupního svazku (nejčastěji dálkovou funkci) a parabolou, která tvoří druhou funkci (nejčastěji potkávací).

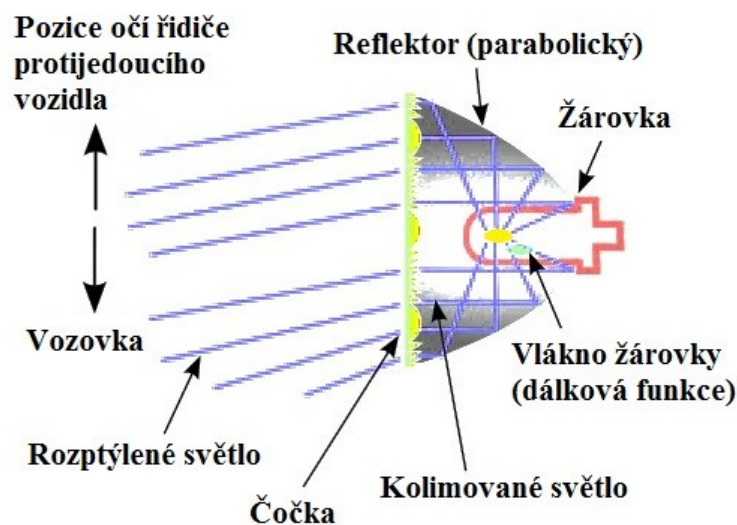
Nejnovější systémy fungují na principu projektoru, s rozdílem, že je například použito více čoček a mikro zrcátka. Tímto systémem jsme schopni zobrazit jakýkoliv tvar svazku na vozovce.

3.2.1. Reflektorový systém

Reflektorový (parabolický) světlomet je nejpoužívanější typ světlometu. Můžeme jej vidět na téměř každém automobilu. Důvodem je cenová dostupnost, spolehlivost a jednoduchost tohoto systému. Zjednodušeně můžeme světlomet popsat jako soustavu paraboly a zdroje světelného záření. Uvnitř paraboly dochází k odrazu paprsků ze světelného zdroje. Hlavní funkcí tohoto světlometu je odrazit veškeré paprsky světelného zdroje. Světelným zdrojem je vlákno žárovky nebo čip LED diody. Abychom dosáhli co největší odrazivosti, nanášíme na parabolu kovovou vrstvu. Díky této vrstvě můžeme počítat s přibližně 80 % odrazivostí.

Parabolický reflektor s optikou na skle

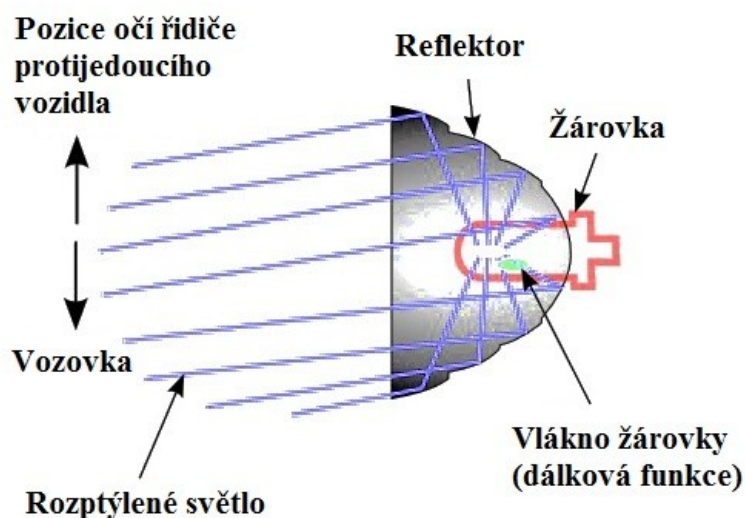
Prvním a taky nejstarším reflektorovým systémem je tzv. parabolický reflektor s optikou na skle. Zdroj je umístěn do ohniska paraboly. Vzdálenost ohniska nám určuje výstupní svazek. Je-li zdroj přímo v ohnisku, výstupním svazkem je dálková funkce světlometu. Pokud je však zdroj před ohniskem, je aktivována funkce potkávací. Jelikož tedy potřebujeme světelný zdroj mít na dvou místech, využíváme dvouvláknové žárovky. Abychom při potkávací funkci neoslňovali protijedoucí řidiče, je na krycím skle světlometu optika. V tomto případě optiku představují různé rozptylové vzory jako například klíny, válcové čočky a jejich kombinace. Princip tohoto reflektoru je znázorněn na obrázku 3.9. Optika je navržena tak, abychom při potkávací funkci neoslňovali protijedoucí řidiče.



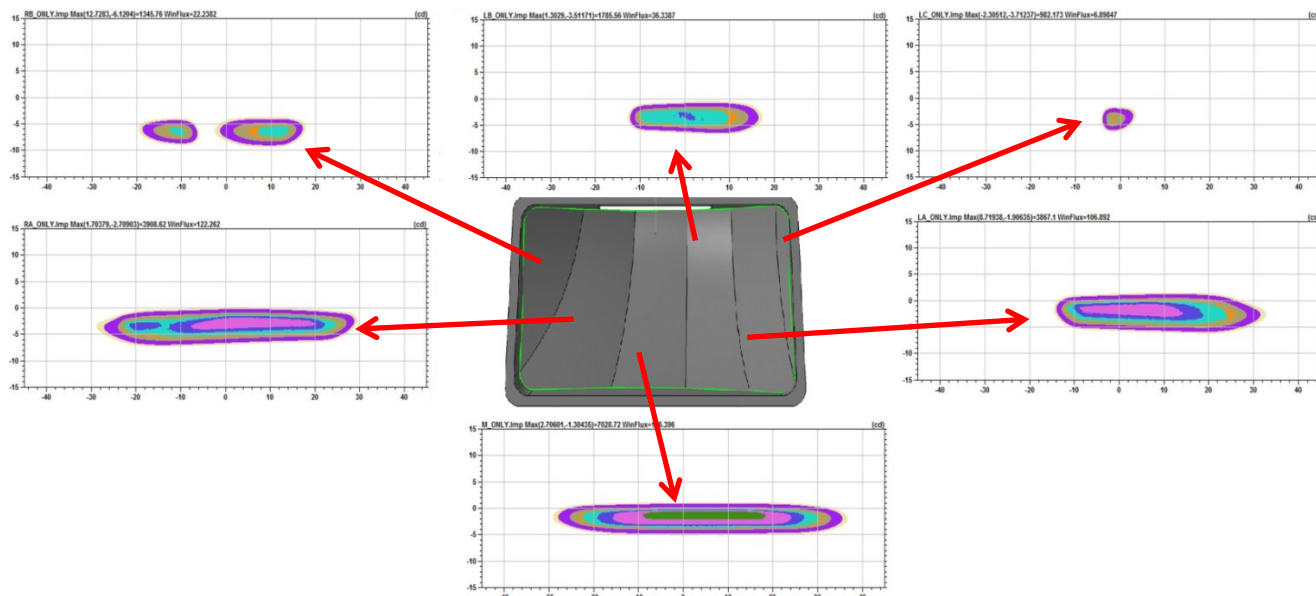
Obr. 3.9 Princip parabolického reflektoru s optikou na skle [9]

Free-form reflektor

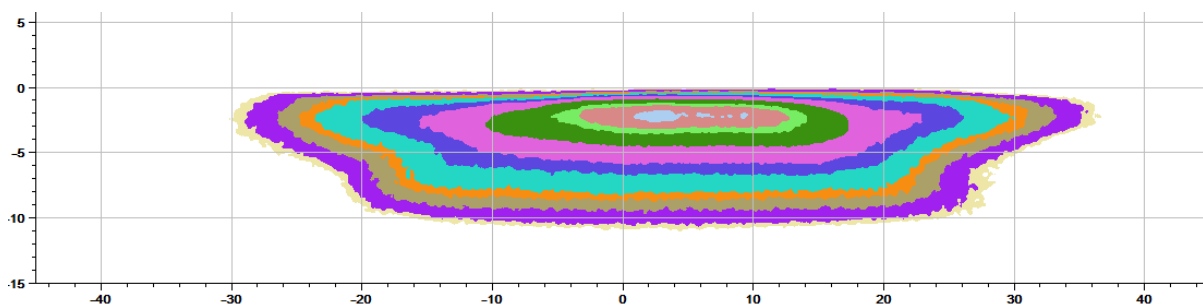
Druhým systémem je Free-form reflektor, jinak řečeno reflektorová optika. Free-form reflektor je plocha tvořena tzv. bézierovými pláty. Každá část této plochy odráží část světelných paprsků ze zdroje do určité oblasti vozovky, jak je vidět na obrázku 3.11. Svazek tedy poskládáme tak, abychom neoslňovali protijedoucí řidiče a abychom splnili legislativní předpis. Není tedy zapotřebí mít na krycím skle žádnou optiku. Na rozdíl od předchozího systému, zde ale potřebujeme vyšší přesnost výroby reflektoru.



Obr. 3.10 Princip free-form reflektoru [9]



Obr. 3.11 Příklad složení základního svazku (free-form reflektor)



Obr. 3.12 Příklad celkového základního svazku

Na obrázku 3.11 je příklad reflektoru, jehož jednotlivé části tvoří celý svazek. Ten je znázorněn na obrázku 3.12. V obou případech jsou zobrazeny fotometrické mapy, jejichž osy představují úhlové souřadnice a barevné spektrum znázorňuje hodnoty svítivosti.

3.2.2. Projektor

Projektorový systém, mnohdy nazýván jako systém elipsoidní, je už značně složitější. Využívá nejen odrazné plochy reflektoru a světelného zdroje, ale také i čočky a v případech pro potkávací funkci i clonky. Díky použití eliptického reflektoru máme možnost navrhnout světlomet menších rozměrů. A dnes už to nemusí být pouze reflektor, ale také jiná primární optika. Pokrok projektorových systémů je nezastavitelný a v dnešní době v sobě ukrývá ty nejpokročilejší technologie. V minulých letech byl projektor pouze v nejvyšších stupních výbavy automobilů. Dnes je projektor žádan i do nižších řad výbavy.

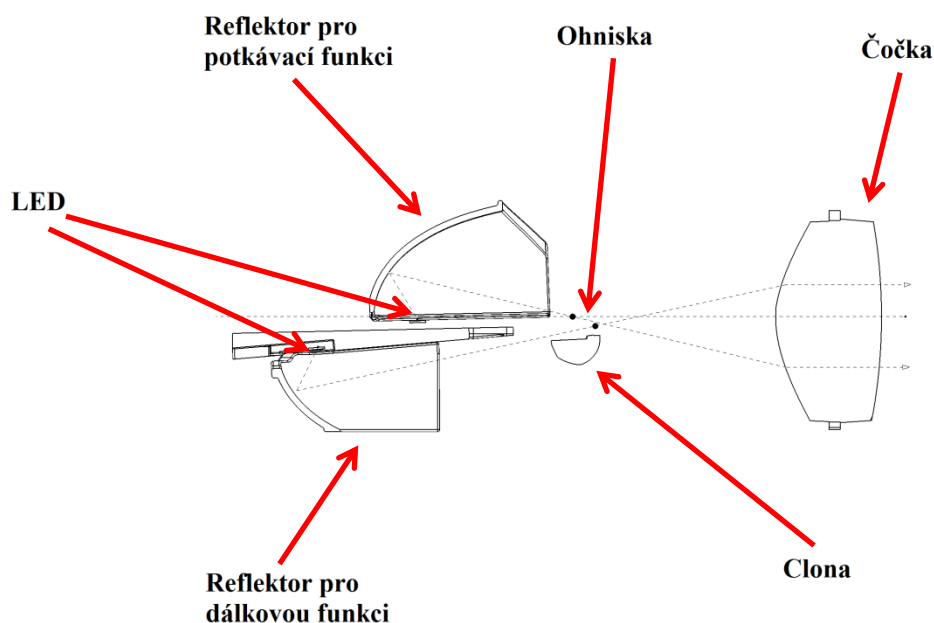
Čočka je optická soustava, skládající se ze dvou ploch, například kulových nebo rovinných. Uspořádáním těchto ploch rozlišujeme čočky spojně a rozptylné.

Spojné čočky paprsky sbíhají a za nimi tak vzniká bod, kde se spojují, označované jako ohnisko. Před čočkou vytváří skutečný obraz. Spojné čočky můžeme rozdělit na

- a) bikonvexní – neboli dvojevypuklé. Obě plochy jsou vypuklé.
- b) plankonvexní – neboli ploskovypuklá. Pouze jedna plocha je vypuklá, druhá rovinná.
- c) konkávkonvexní – dutovypuklá. Jeden z povrchů je dutý, druhý vypuklý [11].

Rozptylné čočky naopak paprsky rozbíhají, proto se jim také říká rozptylky. Svazek vychází z ohniska před čočkou a vytváří obraz zdánlivý. Rozptylné čočky můžeme rozdělit na

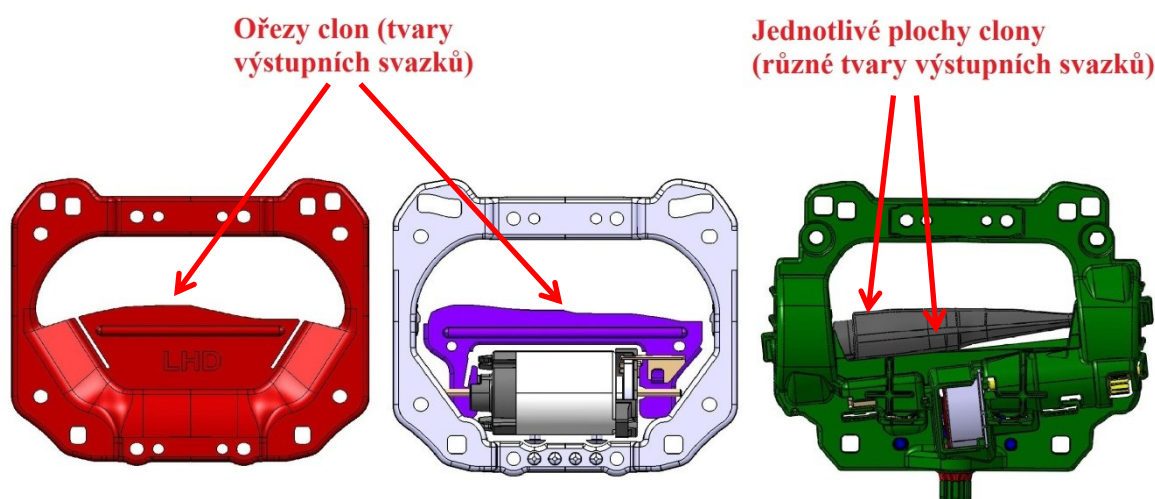
- a) bikonkávní – neboli dvojduté, kdy oba povrchy jsou duté.
- b) plankonkávní – také ploskoduté. Jeden povrch dutý, druhý rovinný.
- c) konvexkonkávní – vypukloduté. Jeden povrch je vypuklý, druhý dutý [11].



Obr. 3.13 Příklad řezu bifunkčním projektorem a jeho princip

Na rozdíl od reflektorového systému, využíváme u projektoru dvě ohniska. V prvním ohnisku, tak samo jako u parabolických reflektorů, je umístěn světelný zdroj. Paprsky odražené eliptickým reflektorem jsou soustředěny do druhého ohniska – ohniska čočky, kde je zároveň umístěna clona. Pomocí clony jsme pak schopni určovat tvar svazku. Projektory dělíme na monofunkční nebo bifunkční. Již z názvu můžeme určit, že se jedná o projektory, které plní pouze jednu funkci světlometu nebo dvě. Tedy funkci dálkovou a potkávací. Monofunkční projektory mají pevnou clonu, kterou tvoří požadovaný tvar svazku na vozovce. Abychom docílili obou funkcí, tedy dálkové i

potkávací, jsou bifunkční projektory vybaveny pohyblivou clonou, ovládanou nejčastěji elektromagnetem. U starších projektorů měla clona dvě polohy, a to vertikální poloha – potkávací funkce a poloha sklopená – dálková funkce. Na obrázku 3.13 je příklad bifunkčního projektoru a jeho princip. V ohniscích je clona, která pomocí její rotace umožňuje zapínat či vypínat dálkovou funkci. Na obrázku je bifunkční projektor ve funkci dálkové. Clona je sklopená a svítí obě funkce. Jakmile se clona otočí do určité polohy, zamezí tím průchod paprsků z reflektoru do čočky a zároveň určí tvar hranice svazku pro funkci potkávací. S dobou rostly zákaznické požadavky na různé tvary svazku v závislosti například na rychlost jízdy (dálniční mód, městský mód, apod.). Proto jednoduché clony nahradila clona, umožňující více poloh natočení, a tudíž i odlišných tvarů výstupního svazku potkávací funkce. Tento případ můžeme na obrázku 3.13 vidět také. Clona nemá pravidelný kulatý profil a každým pootočením tvoří odlišný tvar potkávacího světla. Nejnovější projektory už clonu nemusí využívat. Požadovaný výstupní svazek totiž mohou získat inteligentním rozložením výkonu LED.



Obr. 3.14 Příklad clon (zleva): Statická (monofunkční projektor), pohyblivá – dvě polohy (bifunkční projektor), rotační clona splňující více funkcí.

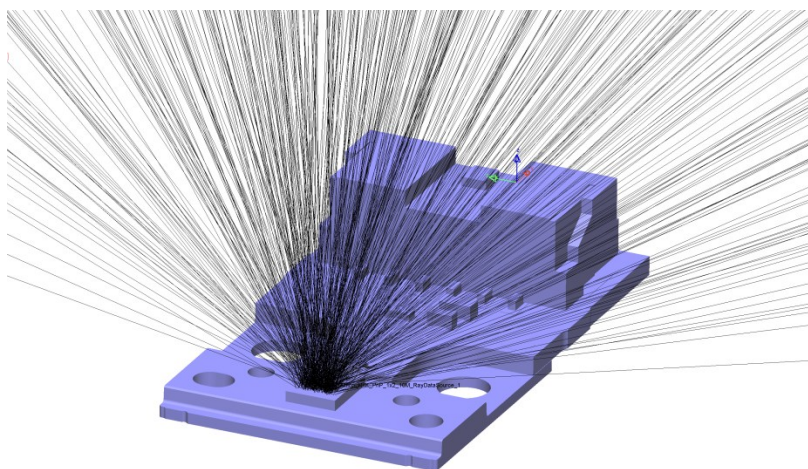
Na obrázku 3.14 jsou zobrazeny všechny tři typy clon. Tedy statická clona, která tvoří monofunkční projektor. Její ořez je pevný a v tomto případě se jedná o funkci potkávací, jelikož její ořez má tvar klínu. Stejný případ je na druhém obrázku s rozdílem, že clonu můžeme ovládat pomocí elektromagnetu a sklopit ji o 90°. Sklopením clony dosáhneme funkce dálkové, protože nebude clona zachytávat žádné paprsky. V posledním případě je clona, umožňující jak funkci dálkovou, potkávací, tak i různé módy potkávacího světla. Rotací této clony, dosáhneme pokaždé odlišného tvaru svazku v závislosti na profilu clony v každém natočení. Tato clona je i předmětem obrázku 3.13.

4. Simulační metody šíření světelného toku

V průběhu designu je nutno provádět simulace, abychom zjistili, že vyrobený optický systém bude splňovat všechny požadavky. K výrobě optického systému dochází až tehdy, když simulace splňuje všechny požadavky na daný systém.

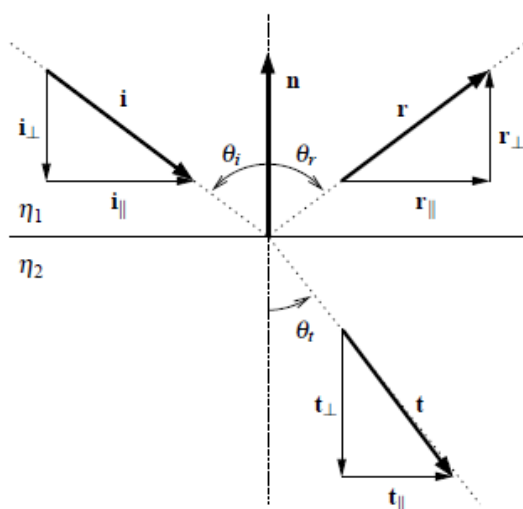
Pro simulace softwarem používáme program Lighttools a nebo interní software navržený R&D střediskem. Simulujeme šíření paprsků optickým systémem a zobrazujeme je na virtuální měřicí stěně vzdálené 25 metrů, pro kterou zároveň probíhají homologace. Oba programy využívají principů a zákonů optiky. Rozdíl je pouze v definování geometrie. Proto se budu simulací zabývat obecně, protože jsou dosti podobné. Pro simulaci optického systému potřebujeme mít nadefinované zdroje, materiály a detektory.

Jako zdroje používáme tzv. „rayfile“ soubory, získané přímo od dodavatelů LED zdrojů. Tyto soubory obsahují přesně zachycené paprsky z LED diody. Zachycené paprsky se získávají fotografováním LED čipu. Speciální fotoaparát zachycuje snímky z různých úhlů rozsvícené LED diody. Následně se pak snímky spojí. Nevýhodou je určitý počet paprsků. Většinou máme zdroje s 5, 10 a 100 milióny paprsků. Pokud potřebujeme simulaci v barevném podání, k paprskům se přiřadí nejpravděpodobnější spektrum. Tyto soubory zajišťuje dodavatel LED diod.



Obr. 4.1 Příklad šíření paprsků LED diody v Lighttools

Pokud máme nadefinované zdroje tak na řadu přichází geometrie. Základní simulace probíhá nesequenčně. To znamená, že obecně paprsek má svůj výchozí bod a následně pouze směr. Paprsky mohou začít kdekoli a pokračovat mohou v jakémkoliv směru. Pokračují až do zastavení některou podmínkou. Po vyslání paprsků ze zdroje, software hledá průsečíky paprsků s geometrií pomocí algoritmu, který podle zákonů optiky počítá, kterým směrem bude paprsek pokračovat. U zrcadlového objektu, potřebujeme paprsek odrazit a v simulaci s čočkou se paprsek láme.



Obr. 4.2 Situace průchodu paprsku dvěma rozhraními [10]

V situaci na obrázku 4.1 máme rozhraní dvou materiálů s rozdílným indexem lomu η_1 a η_2 . Tyto dva materiály mohou být vzduch, voda, sklo. Nezáleží na tom, které z nich má větší index lomu. Počítáme ale, že prostředí η_1 je prostředí, odkud paprsek pochází a η_2 , kam paprsek míří. Tedy přichodí paprsek má vektor i . Směr vektoru odraženého a přeneseného paprsku je r a t . Máme také vektor n , ortogonální k rozhraní a směřující k prvnímu prostředí η_1 [10].

Vektory poté mohou být rozděleny do ortogonálních a paralelních složek rozhraní. Je to vektor v_{\parallel} a v_{\perp} (stále hovoříme o vektorech i , r , t). Proto můžeme použít Pythagorovu větu [10]:

$$|v|^2 = |v_{\parallel}|^2 + |v_{\perp}|^2 \quad (4.1)$$

Úhly dopadu, odrazu a lomu jsou θ_i , θ_r , θ_t .

Odraz (Reflexe)

V tomto případě se jedná o nejjednodušší problém. V případě zrcadlového odrazu je to velmi snadné. Zákon reflexe říká, že úhel dopadu je roven úhlu odrazu [10].

Lom (Refrakce)

Výpočet lomu začíná Snellovým zákonem.

$$\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2 \quad (4.2)$$

Ze vztahu 4.2 vidíme, že $\sin \theta_2$ by musel být větší než 1. A právě v tom je tedy problém. Právě jsme narazili na totální vnitřní odraz neboli TIR (total internal reflection). Přidáme tedy podmínku [10]:

$$\sin \theta_t = \frac{\eta_1}{\eta_2} \sin \theta_i \Leftrightarrow \sin \theta_i \leq \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (4.3)$$

Tuto podmínku uvažujeme za splněnou a najdeme vztah pro t , který vypadá takto:

$$t = \frac{\eta_1}{\eta_2} i + \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \cos \theta_i - \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} \right) n \quad (4.4)$$

Snellovým zákonem získáme $\sin^2\theta_t$.

$$\sin^2\theta_t = \left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right)^2 \sin^2\theta_i = \left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right)^2 (1 - \cos^2\theta_i) \quad (4.5)$$

S Rovnicemi 4.4 a 4.5 máme vše potřebné pro výpočet směr lomeného paprsku. Pokud se však podíváme blíže na rovnici 4.4, všimněme si, že podmínka je naprosto stejná jako podmínka 4.3. Pokud tato podmínka není splněna, nemůžeme najít lomený směr paprsku a to znamená, že nemůžeme provést přenos tohoto paprsku. Dochází tak, jak už bylo zmíněno, k tzv. TIR. Úhel, pod kterým paprsek dopadá na rozhraní, se nazývá kritický úhel [10].

Totální vnitřní odraz a Fresnelovy rovnice

Proč se to nazývá vlastně odrazem a je to omezení při lomu světla. Každý paprsek, který narazí na rozhraní dvou materiálů, se může buď odrazit anebo projít skrze rozhraní. Ze všech paprsků, se jedna část odrazí a druhá se přenesou. První část se nazývá odrazivost a druhá propustnost. Samozřejmě, že množství paprsků, které se odrazí a které projde, je náhodné. Záleží to však na indexu lomu a úhlu, pod kterým paprsek dopadne. A to nám popisují Fresnelovy rovnice. Ty nám udávají poměr mezi odraženou a přenesenou amplitudou elektrického pole k počátečnímu elektrickému poli pro elektromagnetické záření dopadající na dielektrikum. Světlo, jsou totiž elektromagnetické vlny, a proto mají také elektrické pole. Proto také můžeme Fresnelovy rovnice aplikovat. Fresnelovy rovnice nám udávají intenzitu odraženého a lomeného světla [10].

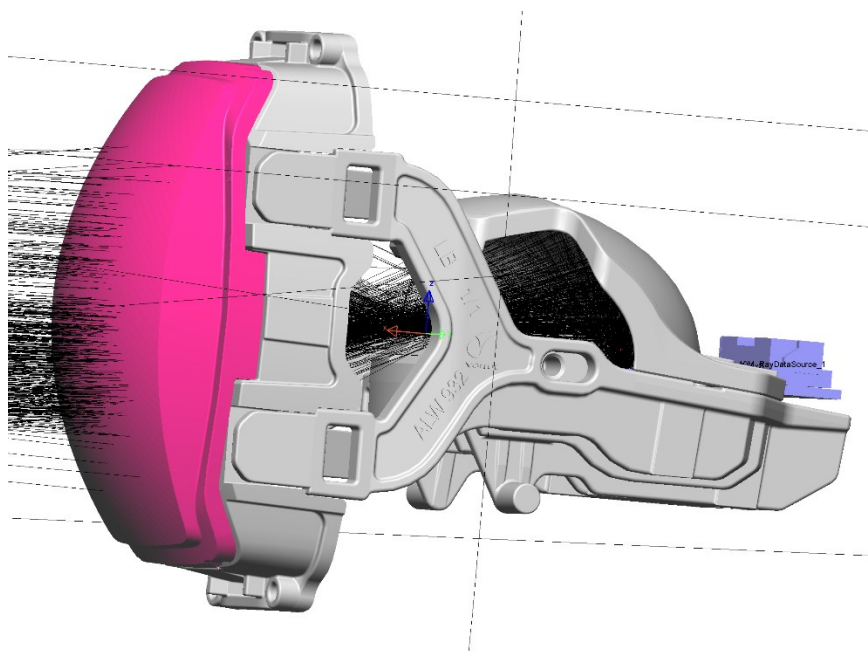
$$R_{\perp}(\theta_i) = \left(\frac{\eta_1 \cos\theta_i - \eta_2 \cos\theta_t}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t}\right)^2 \quad (4.6)$$

$$R_{\parallel}(\theta_i) = \left(\frac{\eta_2 \cos\theta_i - \eta_1 \cos\theta_t}{\eta_2 \cos\theta_i + \eta_1 \cos\theta_t}\right)^2 \quad (4.7)$$

Rovnice 4.6 a 4.7 jsou tzv. Fresnelovy rovnice. Příklad si můžeme vysvětlit v přírodě. Pokud stojíme u jezera a díváme se dolů, vidíme skrze vodu. Čím kolmější je pohled k hladině, tím lépe vidíme. Pokud se však podíváme do dálky, na hladině jezera vidíme odraženou oblohu. Čím je tedy úhel pohledu větší (úhel ke kolmici), odrazivost je větší [10].

Druhý případ nastává tehdy, pokud bychom byli tentokrát pod vodou a pozorovali oblohu kolmo k hladině. V tomto případě bychom oblohu viděli, ale u tohoto případu narůstá odrazivost mnohem rychleji než u předchozího. Se zvyšujícím úhlem docházíme ke kritickému bodu, kde je odrazivost největší a úhel lomu odpovídá 90° . S dalším zvyšováním úhlu, dochází pouze k odrazení paprsků. Nastává totální vnitřní odraz [10].

Nakonec definujeme detektor, který paprsky zachytí. Detektor používáme úhlový. To znamená, že zjišťujeme, pod jakým úhlem paprsek dopadá na detektor, v praxi zeď.

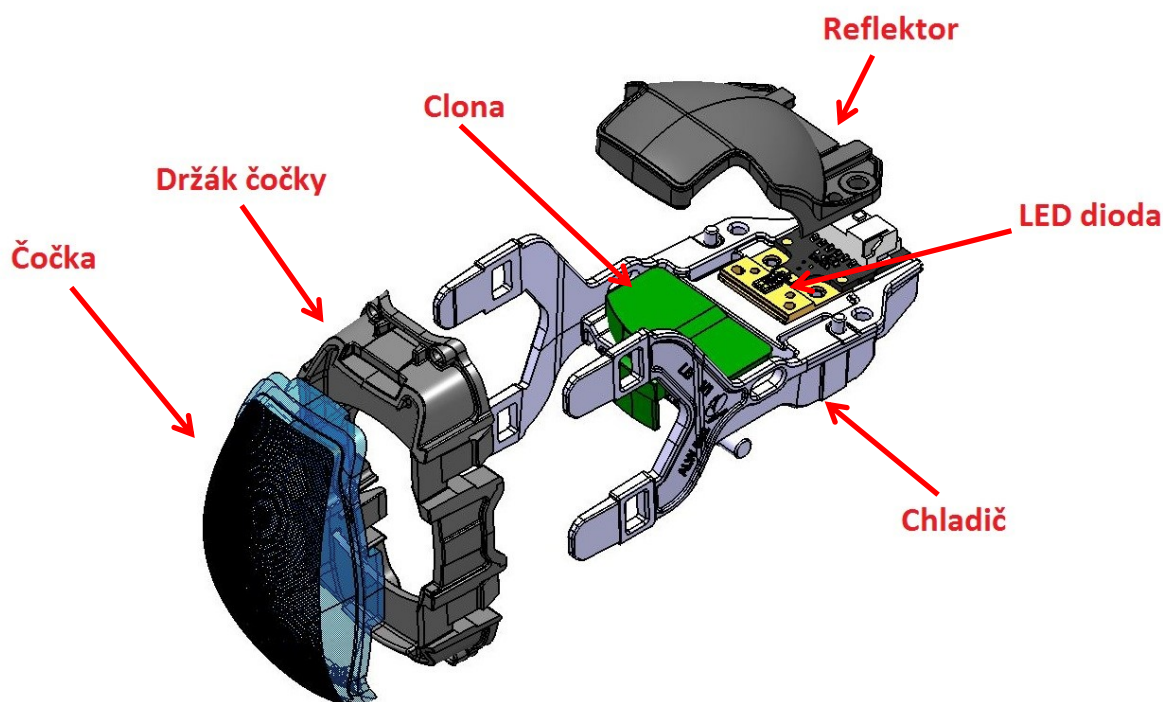


Obr. 4.3 Simulace paprsků v Lighttools

5. Popis a funkce optimalizovaného projektoru

D544 projektor se skládá celkově z pěti projektorů. Z nichž tři tvoří funkci potkávací a dva dálkovou. V této kapitole podrobně popíši projektor potkávací funkce. U tohoto systému se projektor dálkové funkce liší pouze absencí clony a úpravou reflektoru, abychom dostali koncentrovanější světlo do dálky.

LED projektor je složen, jak je popsáno na obrázku 3.15 z čočky, jejího držáku, z chladiče, na němž je osazena LED dioda, reflektoru a clony. Optický systém je tedy založen na reflektoru, LED, čočce a cloně. V projektoru je použita LED dioda se dvěma čipy. Tato LED se nazývá Luxeon Altilon H1K PnP a je od firmy Lumileds. U LED diod je důležitý tzv. bin. Binování je proces, při kterém výrobci třídí LED diody dle stejných parametrů s určitou tolerancí. Je to hlavně z toho důvodu, že výroba LED je složitý proces, při kterém nezískáme vždy čip se stejnými vlastnostmi. Parametry se týkají hlavně světelného toku a teploty chromatičnosti. Toto binování a další parametry LED diody jsou vždy uvedeny v datovém listě. Ten je k dispozici přímo u výrobce. Tento datový list je uveden v příloze této práce (Příloha A).

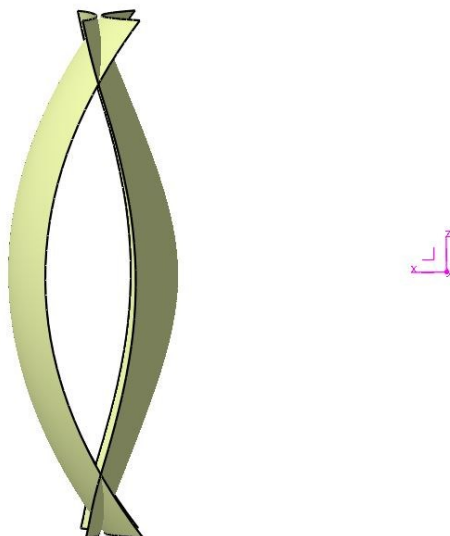


Obr. 5.1 Konstrukční řešení LED projektoru D544

5.1. Čočka

Je tvořena z průhledného materiálu. Dříve byly čočky pouze kulaté a vyráběné ze skla. Dnes, protože jsou požadavky zákazníků náročné na styl, se vyrábějí čočky obdélníkového tvaru a z plastu. Nejčastěji je to Polymetylmetakrylát (PMMA-HT). Tyto materiály jsou použity proto, že mají větší

index lomu než okolní prostředí, který je přibližně 1,492. Dalším důvodem je také odolnost proti žloutnutí. V případě projektoru D544 se jedná o čočku bikonvexní. Na obrázku 3.16 vidíme navržené dvě kulové plochy a ohnisko. Tyto dvě plochy nám tvoří čočku D544.



Obr. 5.2 Plochy bikonvexní čočky D544

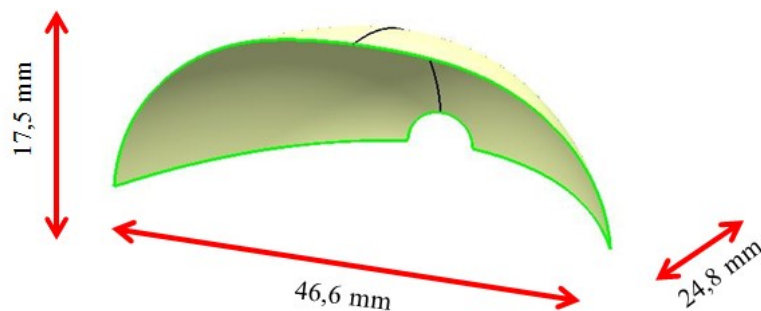
Takto navrženou čočku získáme pomocí softwaru, kde si určíme materiál čočky, tloušťku a její ohnisko. Dále je třeba nastavit rozptylové funkce tak, abychom měli svazek rozptýlený dle našich požadavků. Dále jsou tyto data u mechanického týmu, kde je třeba čočku zkonstruovat tak, aby ji bylo možné vyrobit, uchytit apod. Pro představu výška této čočky je 60 mm a šířka 32 mm.

5.2. Reflektor

V kapitole 3.2.2 je popsáno, že projektor využívá eliptického reflektoru, často nazývaným i jako odražeč. Bylo také zmíněno, že stačí malý rozměr reflektoru, abychom dosáhli požadovaného svazku a projektor D544 je toho důkazem.

V prvním ohnisku reflektoru je umístěn zdroj, a to Altilon se dvěma čipy. V projektorovém systému je reflektor pouze jako část celkového reflektoru navrženého v 3D softwaru. Je to proto, že LED dioda vyzařuje paprsky v úhlu 120° . Při návrhu se snažíme pokrýt reflektorem co nejvíce paprsků vyzářených LED diodou. Odraz paprsků reflektorem je dán Snellovým zákonem odrazu.

Reflektor je vyroben z plastu PC-HT, tedy teplotně odolný polykarbonát, a následně pokoven. Pokovení je z hliníku a díky němu dosahujeme na reflektoru až 80 % odraznosti.



Obr. 5.3 Navržená plocha reflektoru a její rozměry v mm

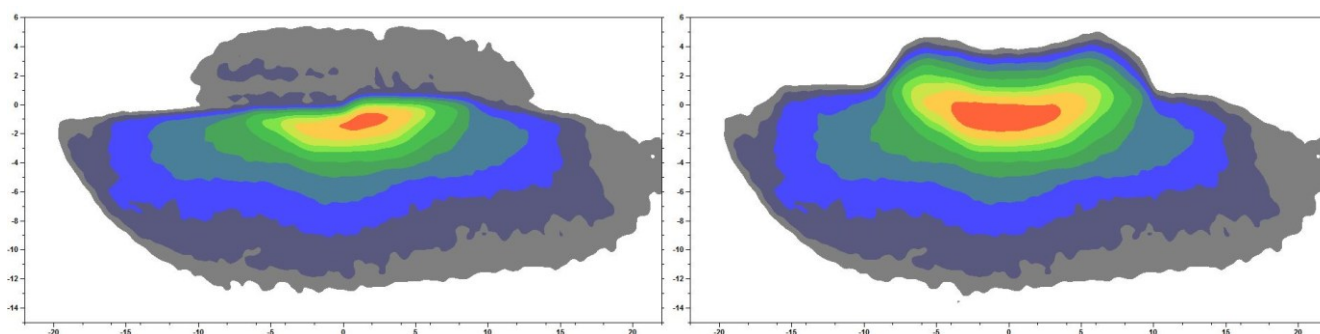
5.3. Clona

Bez clony bychom měli na cestě svazek, který by oslňoval a už v žádném případě nesplňoval legitimní předpisy. Clona ořezává výstupní svazek z reflektoru, abychom vytvořili potkávací funkci a zároveň neoslňovali protijedoucí řidiče.

Clona je jednoduchý plastový díl z PC-HT, tedy z teplotně odolného polykarbonátu, který plní nejvíce fotometrických bodů pro splnění předpisu.

Clonu dále pokovíme nanesením vrstvy hliníku. Ta nám zaručí, že část světla se ještě odrazí a zlepší nám fotometrické vlastnosti svazku. Clona opravdu zastává jednu z nejdůležitějších funkcí v projektoru. Tvar svazku v podstatě závisí jen na cloně. Clonou také vytváříme třetí pásmo, které se nachází nad svazkem a její intenzita nesmí překročit hodnotu 1 lx. Tato hodnota je měřena na fotometrické měřicí stěně vzdálené 25 m.

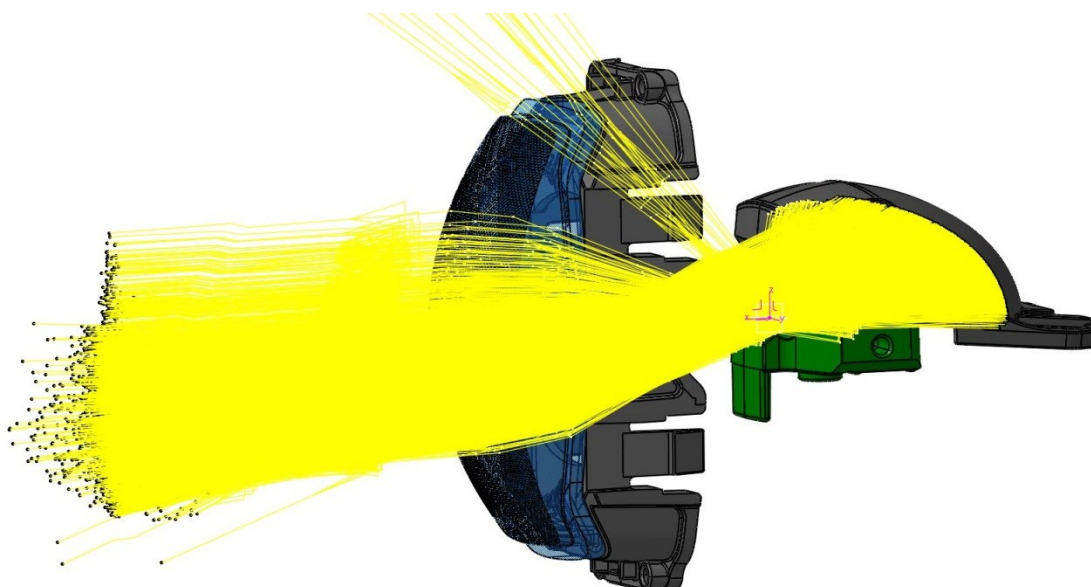
Na obrázku 5.4 vidíme důležitost clony a nad klínem zmiňované třetí pásmo. Také fotometrickou mapu s absencí clony. Fotometrická mapa má osy v úhlových souřadnicích. Jednotlivé barvy představují intenzity osvětlení na měřicí stěně. Například oranžová intenzita vyjadřuje hodnotu 50 lx a modrá intenzita 1 lx.



Obr. 5.4 Vlevo fotometrická mapa s clonou a třetím pásmem, vpravo bez clony

5.4. Funkce

Pokud poskládáme tyto tři prvky, zmíněné v předešlých podkapitolách, dostaneme optický systém D544. Tento systém funguje tak, že LED zdroj světla je umístěn do prvního ohniska reflektoru. Reflektor tyto paprsky odráží a směřuje do ohniska druhého. Tímto ohniskem je zároveň i ohnisko čočky. Zde pomocí reflektoru a clony vytváříme obraz, který promítáme čočkou na vozovku. Je tedy hodně důležité, abychom všechny tyto prvky vyrobili, co s největší přesností, protože každá odchylka znamená nesplnění minimálně jednoho bodu předpisu. Na obrázku 5.5 můžeme vidět simulaci paprsků, tedy skutečnost, že reflektor koncentruje paprsky do ohniska, na clonu, a odtud přes čočku na vozovku.



Obr. 5.5 Simulace paprsků projektorem D544

5.5. Účinnost projektoru D544

Účinnost systému jsem počítal jako samotný jeden projektorový modul. Většinou do účinnosti počítáme také ztráty na skle, které činí přibližně 15 %. Tyto ztráty jsem ale nezahrnoval, protože se jedná o účinnost pouze projektoru. Úplně na začátku projektorového systému je LED zdroj, u kterého výrobce udává světelný tok v tzv. cold a hot stavu. Tedy světelný tok při studeném stavu a světelný tok při zahřátí na určitý počet stupňů, deklarovaný výrobcem. V našem případě máme LED zdroj se dvěma čipy se světelným tokem 795 lm v cold stavu. Odečtením 10 % dostaneme hodnotu hot, která činí přibližně 715 lm. Účinnost D544 projektoru jsem si ověřil pomocí simulace v Lighttoolsu, kde jsem postupným trasováním paprsků a přidáváním komponentů projektoru zjistil procentuální ztrátu světelného toku napříč celým systémem. Hodnoty ze simulace jsou uvedené v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Účinnost projektoru D544

	LED v hot stavu	LED+Reflektor	LED+Reflektor +Clona	LED+Reflektor+Clona+ Čočka
Φ [lm]	713	489	454	400
Účinnost [%]	100	68,6	63,7	56

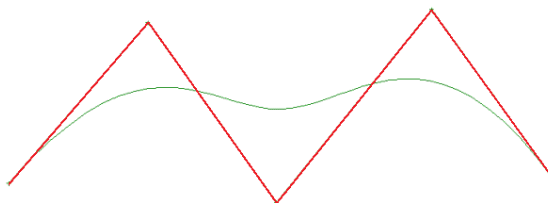
Jak lze vidět v tabulce, při zadání LED zdroje se 715 lm jsem v simulaci dostal téměř stejný výsledek a tuto hodnotu jsem vzal jako 100 %, tedy stoprocentní účinnost. Rozdílné 2 lm je možno brát jako nepřesnost simulace, protože při simulaci vždy zadáváme určitý počet paprsků, zatímco při reálném měření nikoliv. Dále jsem přidal reflektor a ten, jak víme, má přibližně 80 % odrazivost. Tato hodnota se nám potvrdila. Skutečně odražené paprsky korespondovaly s hodnotou 573 lm, což je 81 %. Musíme vzít ale v úvahu, že ne všechny paprsky odražené reflektorem promítneme na vozovku a taky ne všechny paprsky dopadají na reflektor. Část paprsků například dopadne mimo čočku. Čili světelný tok odražený reflektorem dopadající na čočku činí 489 lm. Při aplikaci clony jsem naměřil 454 lm. Tady vidíme, že kupodivu clona neměla výrazný vliv na účinnost tohoto systému. Nakonec jsem otrasoval celý systém, s výsledkem 400 lm. Pro porovnání, změřená fotometrická mapa na zkušebně měla 390 lm. Účinnost projektoru D544 je tedy 56 %.

6. Výpočet a funkce textury na čočce projektoru

Texturu používáme zejména k rozostření hranice svazku a k dosažení homogenity. Textura nám tedy rozptýlí výstupní svazek.

6.1. NURBS

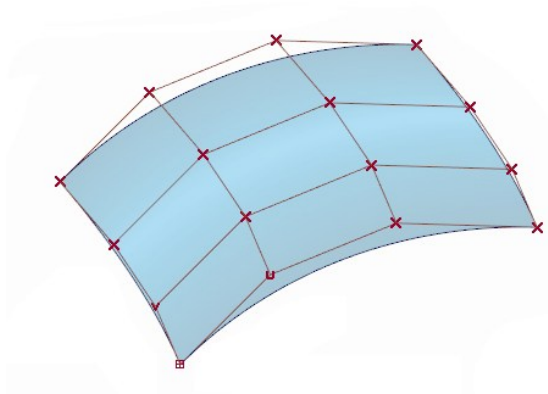
Pro výpočet textury je potřeba znát NURBS plochy a křivky. NURBS je matematický model pro vytváření ploch v počítačové grafice. NURBS, Non-Uniform Rational B-Splines, je v předkladu nerovnoměrná racionální B-spline. B-spline je křivka složená z Coonsových křivek a je ve všech vnitřních bodech spojitá. Pomocí B-spline můžeme definovat hladké křivky a plochy. Tyto křivky jsou ovlivněny pozicemi definovaných bodů, nazvaných řídicí body. Definované jsou dále váhami těchto bodů, stupněm a vektorem. Křivka prochází prvním a posledním bodem sítě řídicích bodů. Pokud změním polohu nebo váhu jednoho bodu, pak tvar křivky je změněn, a to pouze v části této křivky. Křivky jsou racionální, protože parametrizace křivky je tvořena racionálně lomenými funkcemi [12].



Obr. 6.1 Křivka NURBS [12]

Na obrázku 6.1 je červeně znázorněna křivka s řídicími body. Zeleně pak B-spline tvořena dvěma počátečními body, přičemž váhy řídicích bodů určují konkrétní tvar křivky [12].

NURBS plochy jsou pak zobecnění B-spline.



Obr. 6.2 NURBS plocha [13]

Takto jsou tvořeny jednotlivé dílčí plochy textury. Při výpočtu textury musíme definovat přesný tvar plochy, na kterou texturu počítáme. Tvar plochy je definován tvarem přední nebo zadní plochy čočky. Navržená textura, pro lepší představivost, vypadá na čočce jako pole polštářků, které mohou mít tvar například čtverce nebo obdélníku [12].

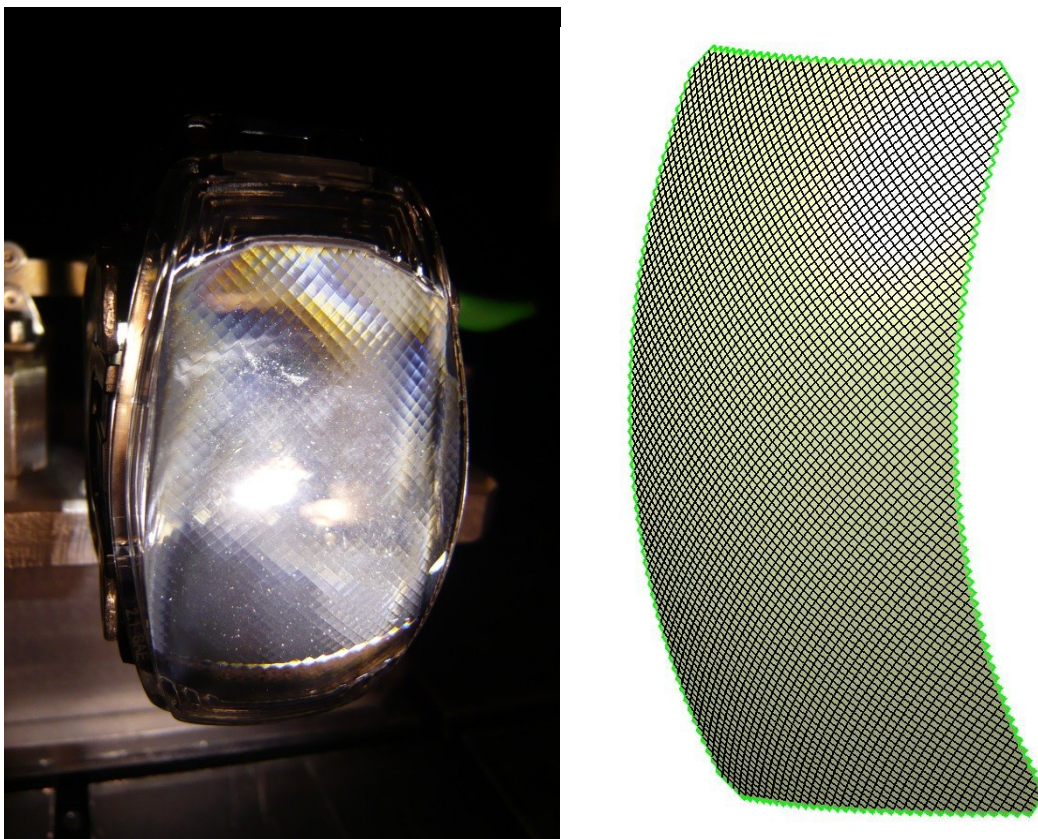
6.2. Vliv a funkce textury na čočku D544

Všeobecně má textura podobný vliv na jakoukoliv čočku. Zpravidla dosáhneme homogennějšího svazku a změnu gradientu (činitele ostrosti) na úkor snížení maximální intenzity osvětlení, měřené na měřicí stěně. Důvodem je, jak už bylo zmíněno, rozptýlení světelného svazku, který má za následek, že paprsky nejsou tak koncentrované. Nicméně na každou čočku a optický systém musí být textura napočítána zvlášť podle specifických zadání.

Při výpočtu textury nastávají nejasnosti, jakou texturu a jaké parametry textury zvolit abychom dosáhli požadovaných výsledků. Na D544 projektu bylo zákazníkem definováno přesné rozmezí hodnoty gradientu a ten se dá právě korigovat pomocí textury. Zvlášť pro evropský a americký trh. Problémovým případem se stala čočka pro americký trh (SAE), která je zde popisována.

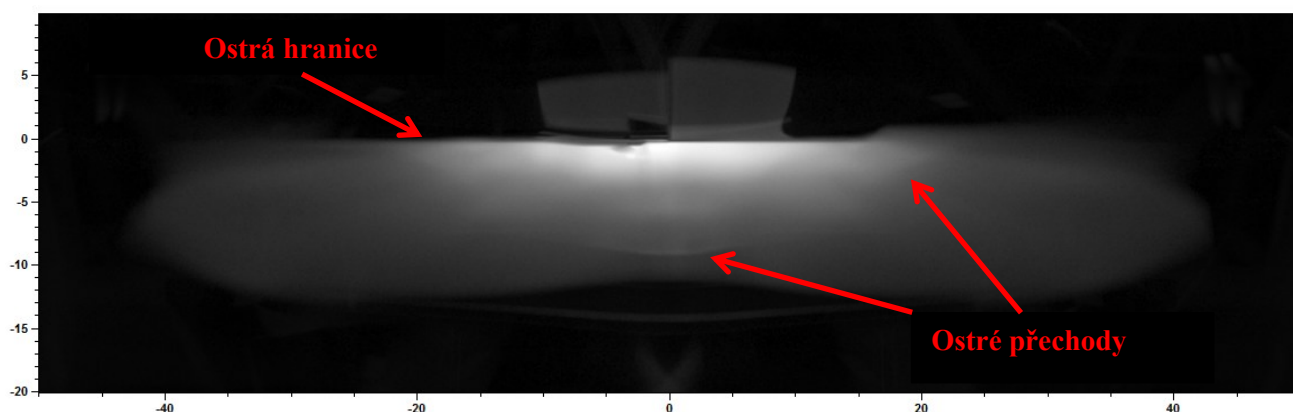
V případě čočky D544 byla zvolena přední strana čočky. Na tuto plochu je pomocí NURBS zkonstruována textura. Hlavním cílem textury na této čočce bylo rozptýlit svazek tak, abychom měli gradient v zadaném rozmezí od zákazníka. Nesmíme taky zapomenout na to, že výstupní svazek musí splňovat nejen fotometrické body, ale také musí mít kvalitativní parametry z hlediska vzhledu. A to jak svazku, z hlediska homogenity, tak čočky. Hodnota gradientu právě udává, jak ostrá bude hranice svazku. Příliš ostrá hranice může mít negativní vliv z pohledu řidiče a příliš rozmazaná hranice může způsobovat oslnění protijedoucích vozidel. Z hlediska designu jsem uvažoval s hodnotou gradientu 0,2.

Textura D544 byla počítána jako bilineární polštářky s konstantním horizontálním i vertikálním rozptylem. Polštářky jsou ve tvaru čtverce, pootočené o 45°.



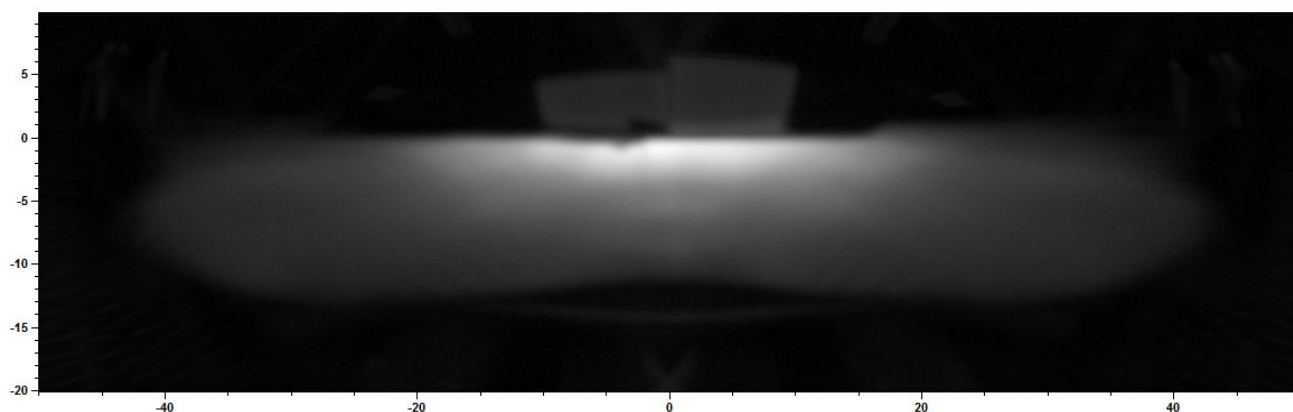
Obr. 6.3 Textura na čočce D544 při měření, reálný kus (vlevo), plocha textury na čočce D544 navržená v CAD (vpravo)

Testováním kombinací parametrů textury zabereme spoustu času. Každou iteraci simulujeme a snažíme se určitými postupy dosáhnout požadovaného výsledku, tedy hodnoty gradientu 0,2 a homogenního svazku. Hodnotu gradientu ověříme tzv. řezy. V předpisech se také udává svislým skenováním. Hodnota gradientu se samozřejmě také měří na svislé měřicí stěně ve vzdálenosti 25m. Výstupní svazek se horizontálně rozdělí po dvou stupních od 30L až 30R. V každém řezu se hledá nejrychlejší změna intenzit osvětlení v rozsahu například -1° až 1° vertikálně s krokem $0,01^\circ$. Gradientem myslíme maximální gradient, což je bod s největší změnou intenzity osvětlení. Laicky řečeno, je to největší „skok“ intenzity světla do tmy. Čím rychlejší změna je, tím je maximální gradient vyšší. Proto je tedy hranice svazku ostřejší. Ve všech těchto řezech musíme splnit hodnotu gradientu v zadaném rozmezí, jak již bylo zmíněno. Jako za základní řez považujeme řez 2R, což je tedy řez ve dvou stupních vpravo a v tomto řezu budeme gradient vyhodnocovat. Dá se říci, že hodnoty gradientů v ostatních řezech, se budou pohybovat okolo něj a jelikož se jedná o čočku pro americký trh, budeme se řídit předpisem FMVSS. Ten nám deklaruje hodnotu gradientu větší než 0,13 a měření má probíhat v řezu 2,5L nebo 2R. Pro finální design, musí být samozřejmě svazek ověřen všemi řezy a dle předpisu musí také splňovat hodnotu gradientu v určitém rozmezí. Při designování můžeme gradient ověřovat jednoduše pomocí simulace, která nám nezabere moc času, a tak, se lze více věnovat návrhu. Gradient si také můžeme ověřit pomocí vzorce 1.1.



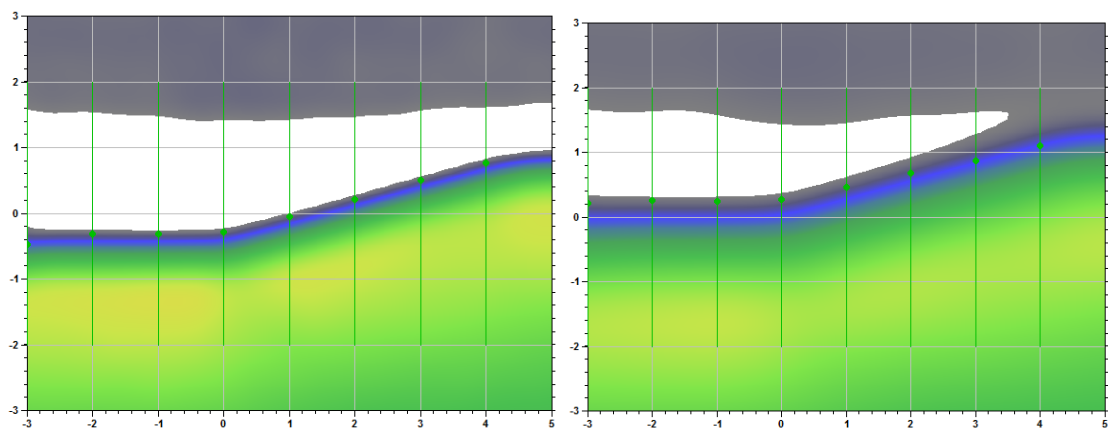
Obr. 6.4 Svazek D544 bez textury na čočce

Na obrázku 6.4 lze vidět svazek s čočkou bez textury. Na osách jsou zobrazeny úhlové souřadnice a fotometrická mapa je převedena do šedé škály. Hodnota gradientu v řezu 2R je 0,77. Tato hodnota tedy odpovídá ostřejší hranici svazku, kterou vidíme na obrázku. Také si lze všimnout mírné nehomogenity.



Obr. 6.5 Svazek D544 s výslednou texturou na čočce

Na obrázku 6.5 pak vidíme výsledný svazek s naladěnou texturou. Osy opět představují úhlové souřadnice. Simulace nám v řezu 2R vypočítala hodnotu maximálního gradientu 0,19 a zároveň si všimněme zlepšení homogenity v určitých oblastech. Pro lepší znázornění rozdílu gradientu s texturou a bez textury, jsem na obrázku 6.6 vykreslil výstupní svazek s detailem na hranici svazku u klínu a s jinou paletou. Jednotlivé osy představují úhlové souřadnice. Jednotlivé čáry zobrazeny zelenou barvou znázorňují řezy, v nichž hledáme maximální gradient.



Obr. 6.6 Výstupní svazek bez textury (vlevo) a výstupní svazek s texturou (vpravo)

Z obrázku je hned patrné, že s čočkou bez textury je změna intenzit u hranice rychlejší, zatímco u čočky s texturou jsou intenzity úhlově roztaženější, tedy změna intenzit je pomalejší a viditelně je hranice svazku, a nejen hranice, rozmazanější. Tím se také svazek posune vertikálně výše, a tak je nutnost jej opět seřadit.

Takto navržená textura není bohužel ještě žádnou výhodou a na řadu přichází ta složitější část, a to je výroba a následné ladění, abychom takového svazku dosáhli i při reálném měření.

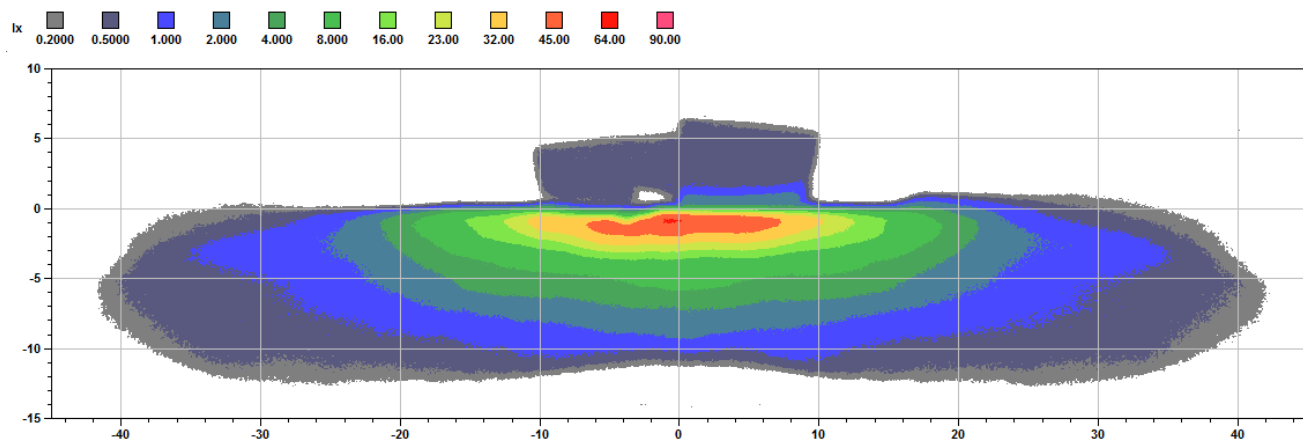
7. Měření fotometrických parametrů optimalizovaného projektoru

V této kapitole se budu zabývat měřením fotometrických parametrů, včetně a hlavně gradientu, jednotlivých čoček s různým typem technologií výroby. Veškerá analýza se bude jednat čoček D544 pro americký trh (SAE), pro kterou jsem navrhoval texturu v kapitole 6. Následně tyto čočky budu porovnávat, a to i z hlediska vzhledu, protože čočka je jedním z prvků v lampě, která je viditelná a zastává důležitou funkci designu a zákazník lpí na opravdu co nejlepší vzhled. Z jednotlivých čoček poté provedu 3D skeny. Tyto skeny dále převedu do počítačového prostředí a následně se pokusím ověřit shodu reálných a simulovaných parametrů. Cílem bude určit nejvhodnější způsob výroby, abychom dosáhli, co nejshodnějšího výsledku s PC simulací, pro kterou byla čočka navržena. Navržená čočka a textura D544 v počítačových simulacích splňuje všechny fotometrické body a požadovaný gradient, ovšem reálné kusy jsou zcela odlišné. Důvodem je přesnost výroby, a proto také budou testovány různé metody. Pro představu, jeden polštárek textury D544, je široký přibližně 0,5 mm a vysoký 0,15 mm.

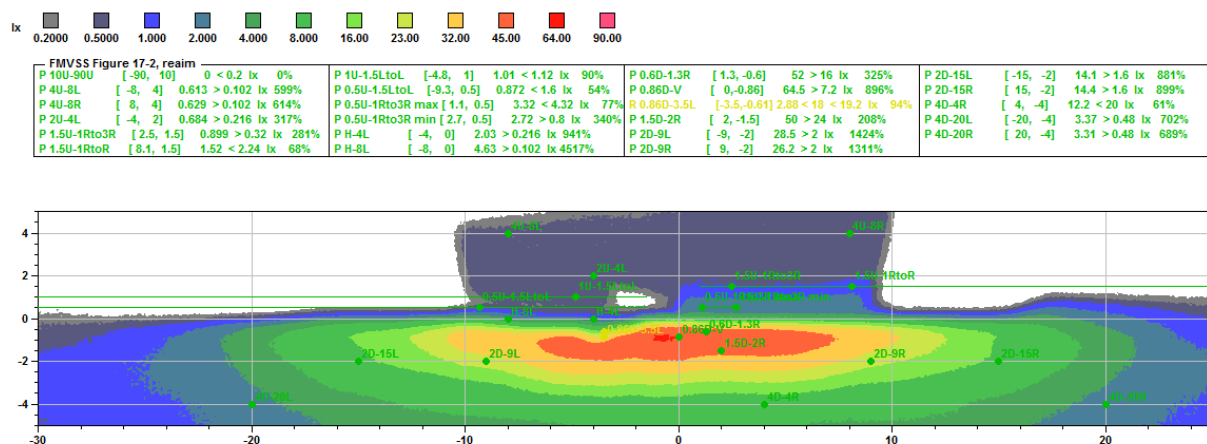


Obr. 7.1 Naskenovaná čočka a převedena do formátu STL počítačového prostředí

Jak už bylo řečeno, potkávací funkce se skládá ze tří stejných projektorů. V tomto měření bude změřen pouze jeden modul. Výsledná mapa by měla být na závěr pro fotometrické vyhodnocení násobená $\times 2,372$. A to z důvodu, že máme 3 moduly, dále počítáme 12% ztráty na skle a 90 % tzv. derating. Derating jsou ztráty způsobené zahřátím systému. V tomto případě ztrácíme přibližně 10 % světelného toku. Odtud tedy $3 \times 0,88 \times 0,9 = 2,372$. Teoreticky bychom v mém měření nemohli počítat s deratingem, protože se jednalo o reálné měření a k zahřátí systému by tedy mělo dojít. Modul byl ale připevněn na velkém hliníkovém přípravku v prostoru zkušebny. Odvod tepla byl tedy dostatečný a nedocházelo tak k většímu zahřátí systému.



Obr. 7.2 Fotometrická mapa CAD simulace – požadový stav



Obr. 7.3 Fotometrická mapa CAD simulace s vyhodnocenými fotometrickými body

Na obrázku 7.2 je zobrazena fotometrická mapa simulovaná PC softwarem dle navrženého designu. Na obrázku 7.3 lze vidět fotometrické body. Zelená barva těchto bodů znázorňuje splnění předpisu. O takto navržený design usilujeme při výrobě. Na osách fotometrických map jsou úhlové souřadnice a zobrazeny jsou intenzity osvětlení v lx.

7.1. Postup měření

Samozřejmostí před každým započatým měřením byly stejné podmínky, jako například teplota okolí, pozice přípravku apod.

Přípravek jsem upevnil do polohy, ve které bude započaté každé další měření. Upevnění probíhalo na stole měřicího goniometru Optronik SMS10. Odtud byl i modul napájen. Po upevnění modulu je důležité nastavit si optický střed. To znamená, že střed čočky bude v ose otáčení goniometru a zároveň v ose fotočlánku. Nastavení probíhalo tak, že jsem stůl pootočil o 90°, tedy naproti ramenu goniometru. Rozsvítil jsem laser, umístěný v rameni, kterým jsem si ověřil, jestli je čočka ve středu otáčení. Pohybuji stolem, aby laser svítil do středu čočky. Stůl poté otočím zpátky a

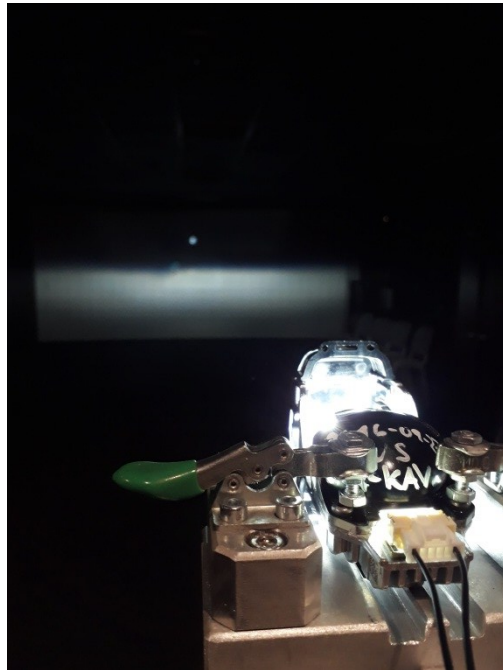
opět musí laser svítit do středu čočky, tentokrát z osy Y. Poté jsem zapojil kabeláž a mohl spustit napájení Optroniku. Používaná LED v modulu D544 má bin B, to znamená, že provozní proud je 1,17 A, a odpovídající napětí na Optroniku bylo 7 V.

Modul je nyní rozsvícen a dalším úkolem je seřadit clonu. Clona se seřizuje v ose X a nastavení spočívá v tom, že clona musí být v ohnisku čočky. Pro tuto polohu je modul designován a správnou polohou clony také dostaneme požadovanou barvu hranice svazku. Clonu v ohnisku poznáme tak, že hranice svazku bude fialové barvy. Při nastavení clony jsem si ověřil jev, který se nazývá disperze. Pohybem clony dopředu, tedy blíže k čočce, se hranice svazku přibližuje k červené barvě. Na druhou stranu, pohybem clony dále od čočky, je hranice modrá.

Takto máme seřízený projektor a můžeme začít měřit. Nejprve si změříme gradient a pak fotometrickou mapu. Při měření gradientu, provedeme řezy od 12L do 12R (dle požadavku zákazníka). Pro srovnání budeme hlavně používat řez 2R, který má mít dle našeho designu hodnotu 0,19. Zároveň jsem samozřejmě kontroloval, jestli hodnoty maximálních gradientů jsou i ve všech řezech v rozmezí, zadané zákazníkem. Řezy byly měřeny od -1° V do 1° V s krokem $0,01^\circ$. Tedy v tomto rozmezí jsem měřil intenzitu osvětlení v lx v každé setině stupně. Následně jsem hledal maximální gradient dle vzorce 1.1 a ověřil jej i výpočtem.

Abychom mohli změřit celou fotometrickou mapu a následně si tak ověřit, zda splňujeme nejen hodnotu maximálního gradientu, ale také fotometrické body, musíme dle předpisu seřadit celý svazek tak, že bod, kde se nachází maximální gradient musí ležet na horizontále. Nyní s krokem $0,1^\circ$ měří goniofotometr celou fotometrickou mapu a následně ji vyhodnotí podle předpisu.

Obsahem každého měření je změřená fotometrická mapa, hodnota gradientu a také simulace naskenované čočky v počítačovém prostředí. Veškeré fotometrické mapy v této kapitole jsou měřeny pomocí goniofotometru (v případě simulace simulovány) na svislé měřicí stěně vzdálené 25 m. Každá fotometrická mapa má úhlové souřadnice na osách x a y. Zobrazené intenzity jsou intenzity osvětlení v lx.



Obr. 7.4 Modul D544 na přípravku ve fotometrickém sále

7.2. Měření čočky – 3osé frézování – neleštěná forma

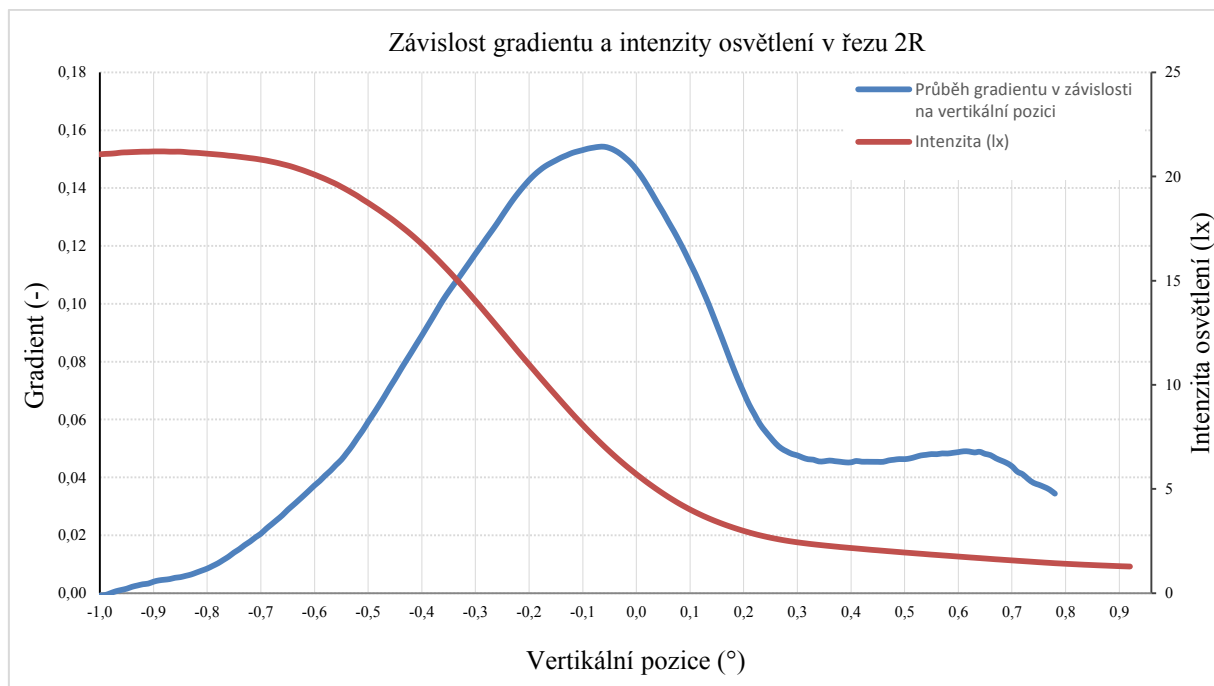
Jedná se o klasickou metodu obrábění, kdy se fréza pohybuje ve třech osách.

7.2.1. Měření gradientu – 3osé frézování – neleštěná forma

Změřený gradient v celém svazku 12L-12R byl v rozmezí 0,099 - 0,157.

Gradient v řezu 2R: $G=0,155$ v pozici $[2, 0.01]$. V tomto bodě byla naměřena intenzita osvětlení $E_{2R}=6,33$ lx.

$$G = (\log E_V - \log E_{(V+0,1^\circ)}) = (\log 6,33 - \log 4,43) = 0,155 \quad (7.1)$$

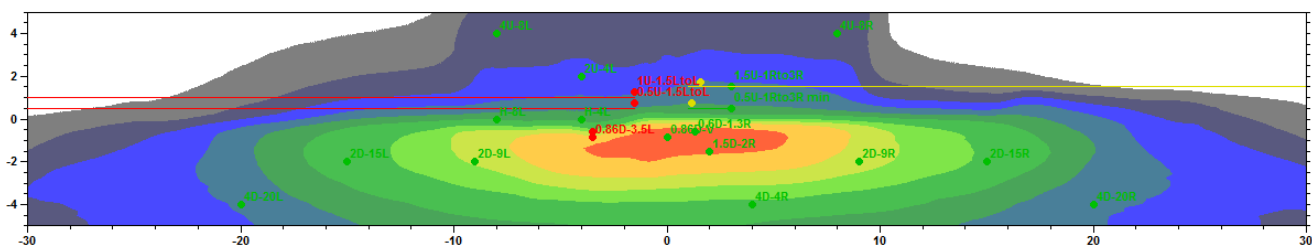


Graf 7.1 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (3osá technologie, neleštěná forma)

7.2.2. Výsledek fotometrického měření – 3osé frézování – neleštěná forma

lx 0.2000 0.5000 1.000 2.000 4.000 8.000 16.00 23.00 32.00 45.00 64.00 90.00

FMVSS Figure 17-2, reaim			R 0.5U-1Rto3R max [1.15, 0.75] 3.85 > 4.32 lx 89%			P 2D-9L [-9, -2] 24.2 > 2 lx 1212%		
P 10U-90U [-49.9, 12]	0.11 < 0.2 lx	55%	P 0.5U-1Rto3R min [3, 0.5]	4.68 > 0.8 lx	585%	P 2D-9R [9, -2]	26.7 > 2 lx	1336%
P 4U-8L [-8, 4]	0.833 > 0.102 lx	813%	P H-4L [-4, 0]	6.55 > 0.216 lx	3032%	P 2D-15L [-15, -2]	11.5 > 1.6 lx	719%
P 4U-8R [8, 4]	0.719 > 0.102 lx	702%	P H-8L [-8, 0]	6.89 > 0.102 lx	6729%	P 2D-15R [15, -2]	14.4 > 1.6 lx	901%
P 2U-4L [-4, 2]	1.22 > 0.216 lx	564%	P 0.6D-1.3R [1.3, -0.6]	49.7 > 16 lx	311%	P 4D-4R [4, -4]	14.2 < 20 lx	71%
P 1.5U-1Rto3R [3, 1.5]	2.25 > 0.32 lx	704%	P 0.86D-V [0, -0.86]	51.4 > 7.2 lx	714%	P 4D-20L [-20, -4]	2.21 > 0.48 lx	461%
R 1.5U-1RtoR [1.6, 1.75]	2.06 < 2.24 lx	92%	F 0.86D-3.5L [-3.5, -0.61]	2.88 < 21.6 < 19.2 lx	112%	P 4D-20R [20, -4]	2.49 > 0.48 lx	520%
F 1U-1.5LtoL [-1.5, 1.25]	1.91 < 1.12 lx	170%	P 1.5D-2R [2, -1.5]	47.3 > 24 lx	197%			
F 0.5U-1.5LtoL [-1.5, 0.75]	2.71 < 1.6 lx	169%						



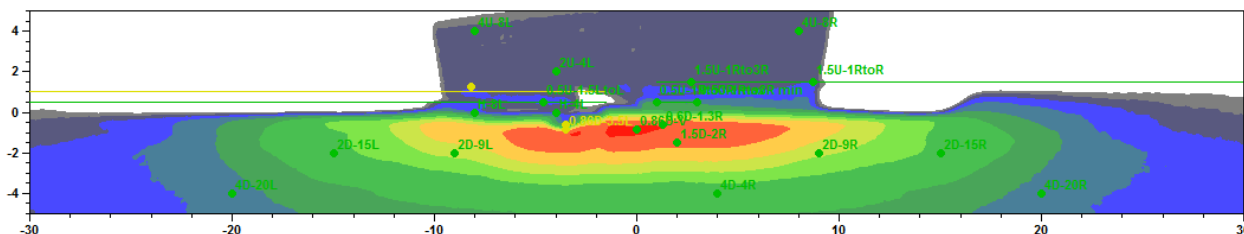
Obr. 7.5 Změřená fotometrická mapa (3osá technologie, neleštěná forma)

7.2.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – 3osé frézování – neleštěná forma

Při zpětné simulaci čočky ze skenu jsem použil co největší možný počet paprsků. Výsledkem je přiložená mapa a hodnota gradientu v řezu 2R. Vše simulace v PC.



FMVSS Figure 17-2, reaim											
P 10U-90U	[-90, 10]	0 < 0.2 lx	0%	P 0.5U-1Rto3R max	[1, 0.5]	3.59 < 4.32 lx	83%	P 2D-9L	[-9, -2]	26.2 > 2 lx	1311%
P 4U-8L	[-8, 4]	0.591 > 0.102 lx	577%	P 0.5U-1Rto3R min	[3, 0.5]	3.15 > 0.8 lx	393%	P 2D-9R	[9, -2]	25.4 > 2 lx	1272%
P 4U-8R	[8, 4]	0.642 > 0.102 lx	627%	P H-4L	[-4, 0]	0.637 > 0.216 lx	295%	P 2D-15L	[-15, -2]	13.5 > 1.6 lx	841%
P 2U-4L	[-4, 2]	0.614 > 0.216 lx	284%	P H-8L	[-8, 0]	1.83 > 0.102 lx	1786%	P 2D-15R	[15, -2]	13.6 > 1.6 lx	851%
P 1.5U-1Rto3R	[2.7, 1.5]	0.681 > 0.32 lx	213%	P 0.6D-1.3R	[1.3, -0.6]	58.3 > 16 lx	364%	P 4D-4R	[4, -4]	13.2 < 20 lx	66%
P 1.5U-1RtoR	[8.7, 1.5]	1.06 < 2.24 lx	47%	P 0.86D-V	[0, -0.86]	66.5 > 7.2 lx	924%	P 4D-20L	[-20, -4]	3.04 > 0.48 lx	634%
R 1U-1.5LtoL	[-8.2, 1.25]	0.843 < 1.12 lx	75%	R 0.86D-3.5L	[-3.5, -0.61]	2.88 < 5.15 < 19.2 lx	27%	P 4D-20R	[20, -4]	3.09 > 0.48 lx	644%
P 0.5U-1.5LtoL	[-4.6, 0.5]	1.18 < 1.6 lx	73%	P 1.5D-2R	[2, -1.5]	50.8 > 24 lx	212%				



Obr. 7.6 Fotometrická mapa – simulace STL (3osá technologie, neleštěná forma)

Hodnota naměřeného gradientu v řezu 2R činila 0,217.

7.3. Měření čočky – 3osé frézování – leštěná forma

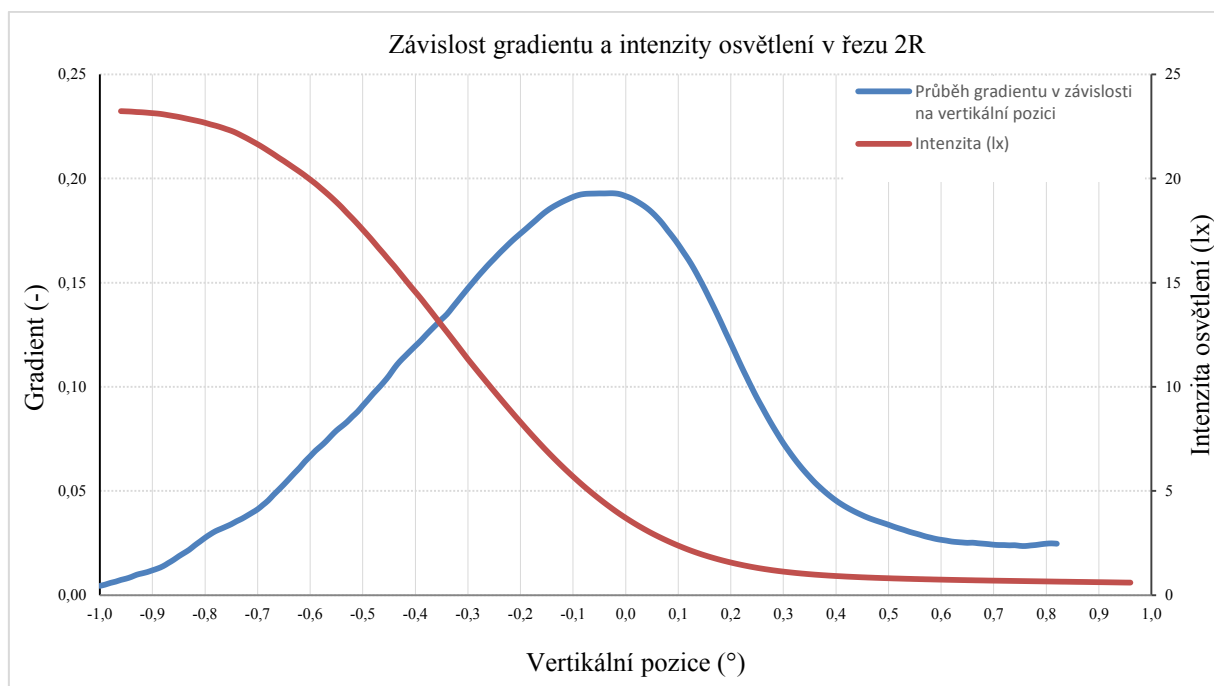
Pro texturu se ukázalo, že to není nejsprávnější metoda výroby, proto následovalo ruční leštění této formy, kterou jsme přesnost zlepšili a také vzhled, protože na čočce z neleštěné formy se objevovaly stopy po fríze a pro zákazníka to bylo nepříjemný stav. Proto zde proběhly dvě měření, a to s čočkami z formy neleštěné a leštěné.

7.3.1. Měření gradientu – 3osé frézování – leštěná forma

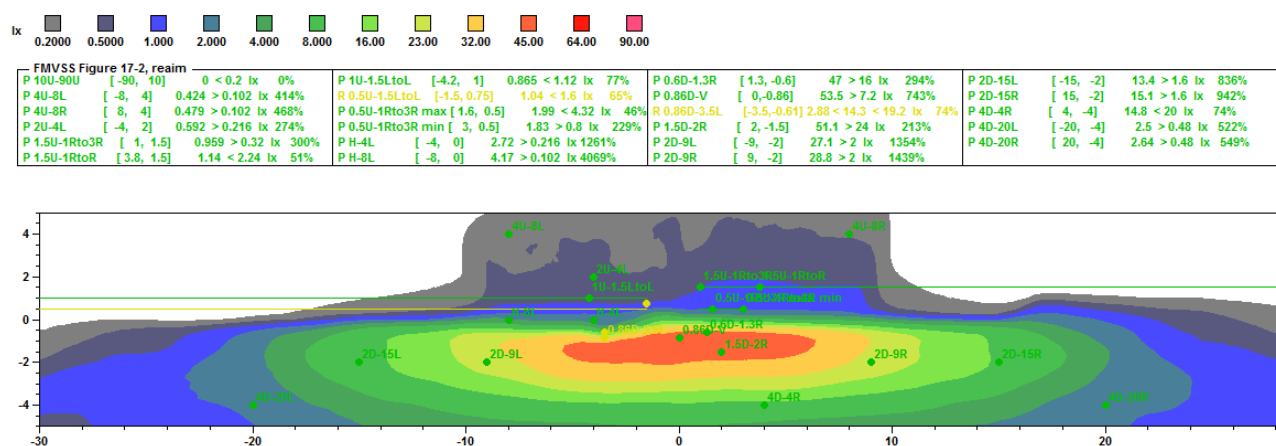
Změřený gradient v celém svazku 12L-12R byl v rozmezí 0,134 - 0,25.

Gradient v řezu 2R: $G=0,194$ v pozici $[2, 0.01]$. V tomto bodě byla naměřena intenzita osvětlení $E_{2R}=3,52$ lx.

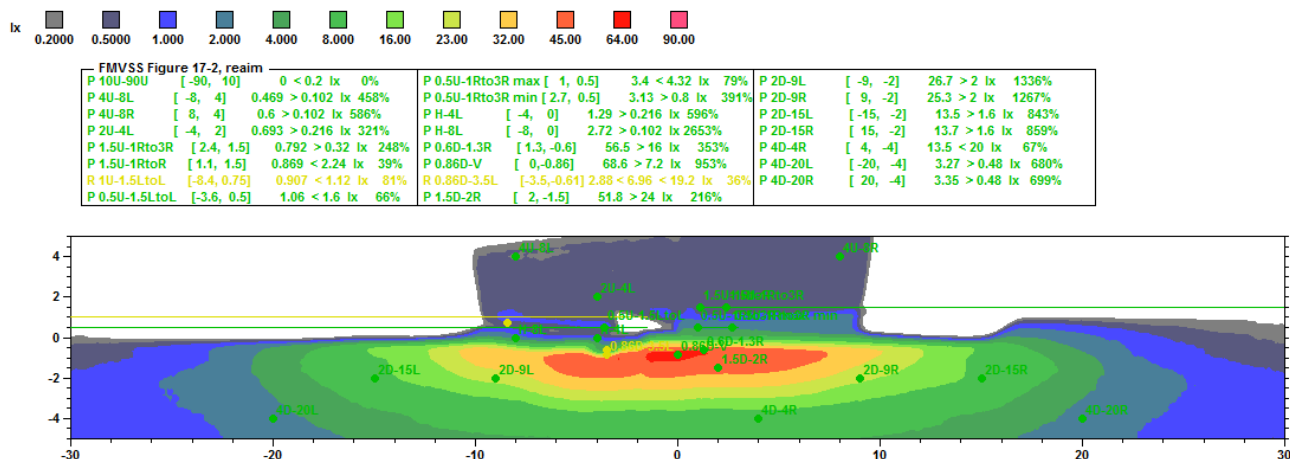
$$G = (\log E_V - \log E_{(V+0,1^\circ)}) = (\log 3,52 - \log 2,25) = 0,194 \quad (7.2)$$



7.3.2. Výsledek fotometrického měření – 3osé frézování – leštěná forma



7.3.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – 3osé frézování – leštěná forma



Obr. 7.8 Fotometrická mapa – simulace STL (3osá technologie, leštěná forma)

Hodnota naměřeného gradientu v řezu 2R činila 0,17.

7.4. Měření čočky – 5osé frézování

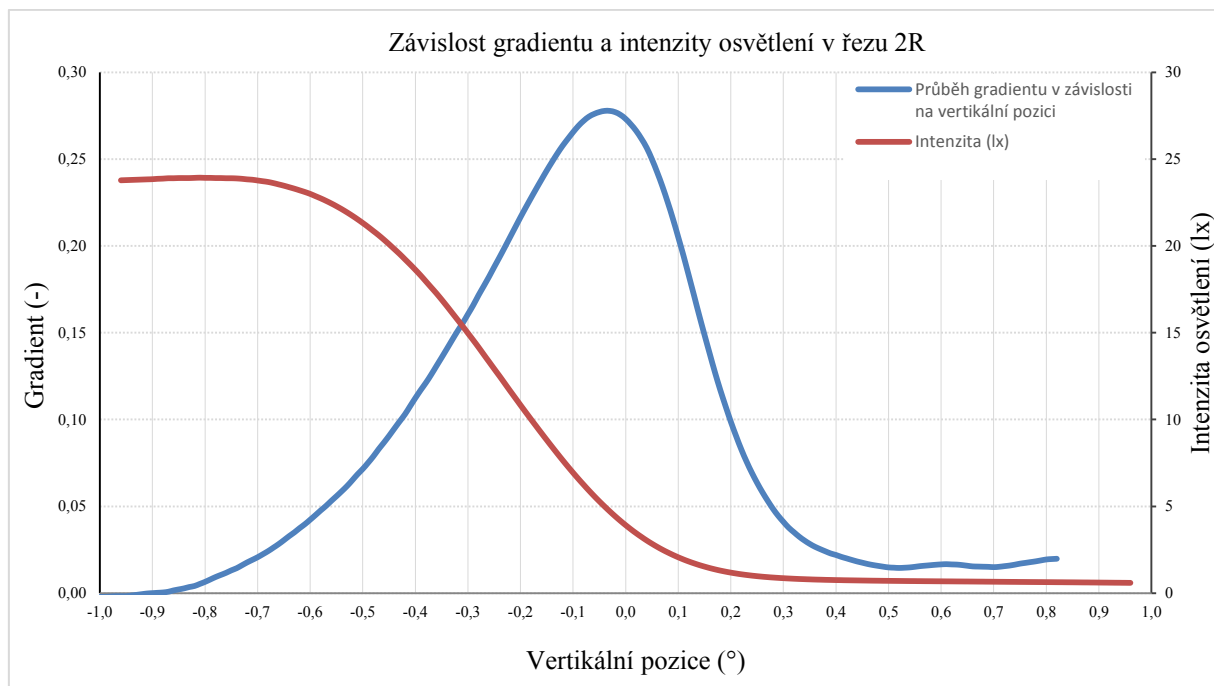
Jedná se o klasickou metodu obrábění, kdy se fréza pohybuje v pěti osách.

7.4.1. Měření gradientu – 5osé frézování

Změřený gradient v celém svazku 12L-12R byl v rozmezí 0,175 - 0,35.

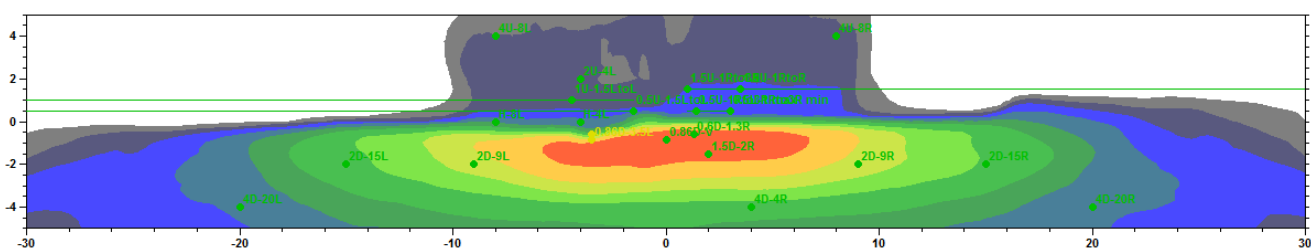
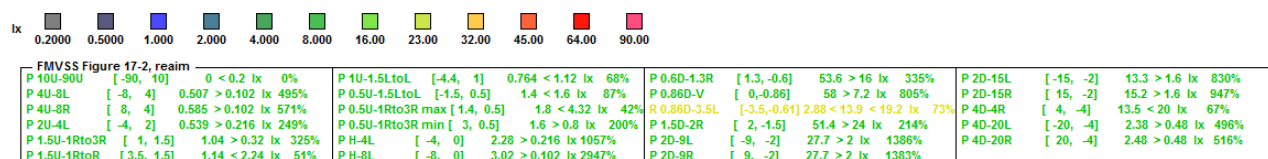
Gradient v řezu 2R: $G=0,281$ v pozici $[2, 0.00]$. V tomto bodě byla naměřena intenzita osvětlení $E_{2R}=3,88$ lx.

$$G = (\log E_V - \log E_{(V+0,1^\circ)}) = (\log 3,88 - \log 2,03) = 0,281 \quad (7.3)$$



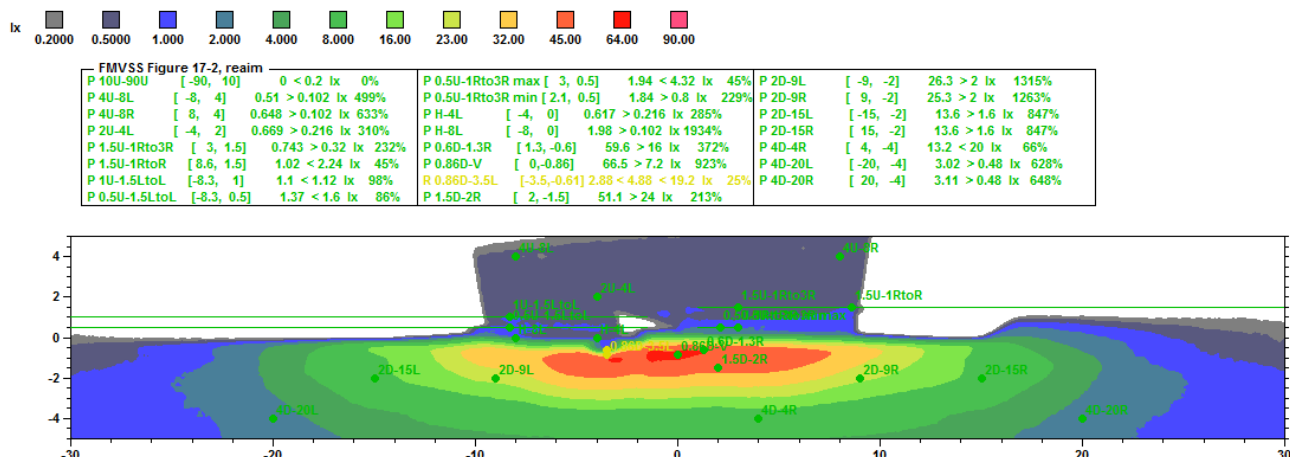
Graf 7.3 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (5osá technologie)

7.4.2. Výsledek fotometrického měření – 5osé frézování



Obr. 7.9 Změřená fotometrická mapa (5osá technologie)

7.4.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – 5osé frézování



Obr. 7.10 Fotometrická mapa – simulace STL (5osá technologie)

Hodnota naměřeného gradientu v řezu 2R činila 0,315.

7.5. Měření čočky – SPDT technologie

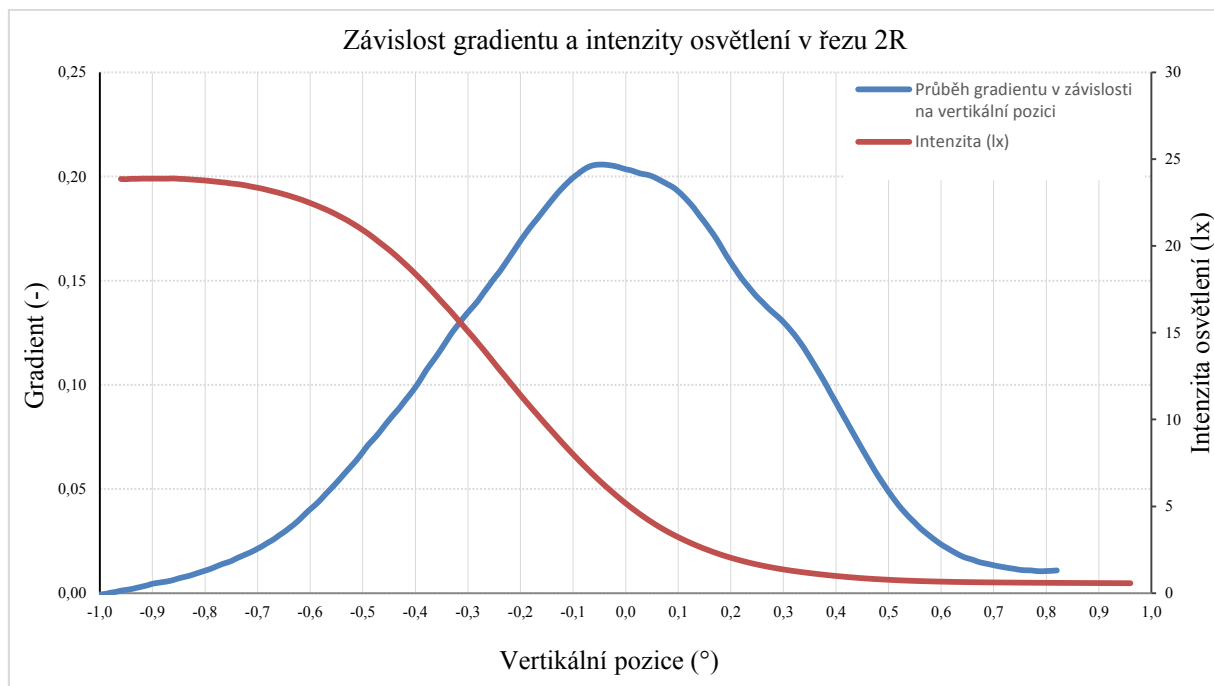
SPDT technologie je vysoce přesné obrábění pomocí diamantu. Single-Point Diamond Turning, neboli SPDT je technologie pomocí níž můžeme dosáhnout tolerance optických ploch až 0,002 mm. Maximální radius nástroje R0,1 mm. Bohužel je tato technologie nejdražší.

7.5.1. Měření gradientu – SPDT technologie

Změřený gradient v celém svazku 12L-12R byl v rozmezí 0,151 - 0,296.

Gradient v řezu 2R: $G=0,207$ v pozici $[2, -0.01]$. V tomto bodě byla naměřena intenzita osvětlení $E_{2R}=5,4$ lx.

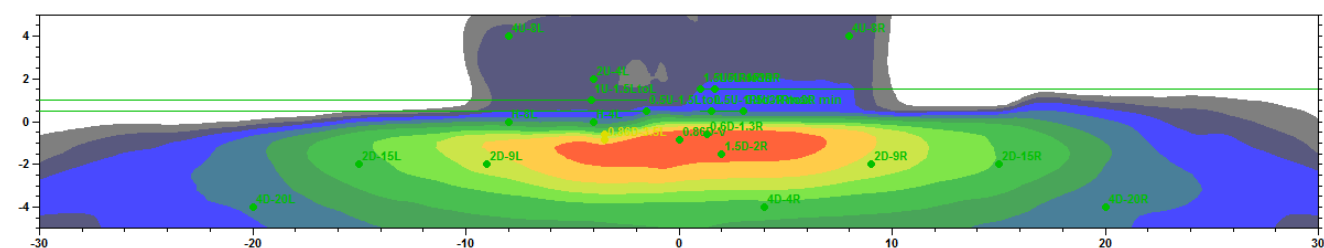
$$G = (\log E_V - \log E_{(V+0,1^\circ)}) = (\log 5,4 - \log 3,35) = 0,207 \quad (7.4)$$



Graf 7.4 Průběh gradientu a intenzity osvětlení v řezu 2R (SPDT technologie)

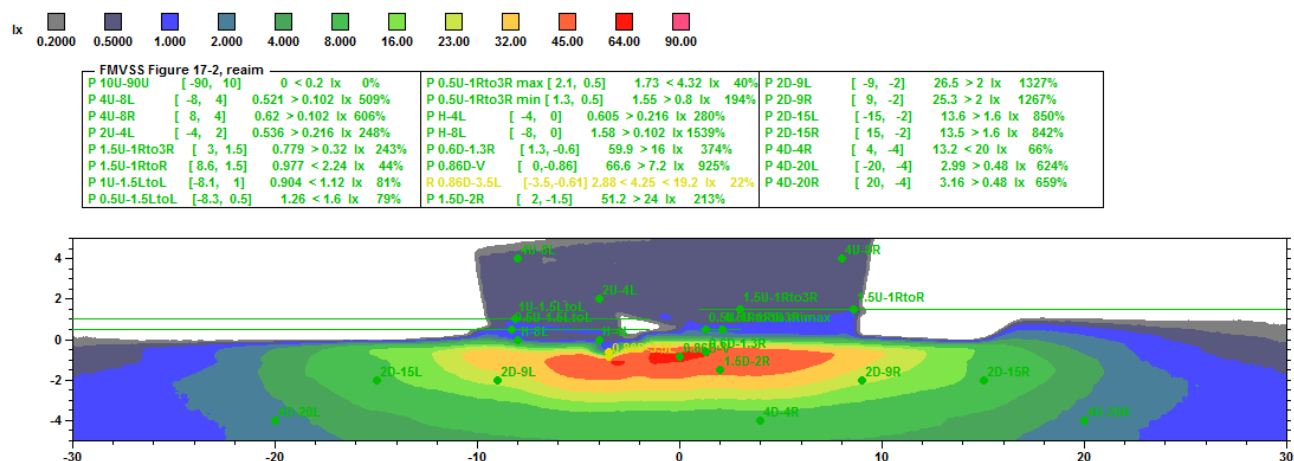
7.5.2. Výsledek fotometrického měření – SPDT technologie

lx	0.2000	0.5000	1.000	2.000	4.000	8.000	16.00	32.00	45.00	64.00	90.00
FMVSS Figure 17-2, realm											
P 10U-90U	[-50, 12]	0.108 < 0.2 lx	54%	P 1U-1.5LtoL	[-4.1, 1]	0.741 < 1.12 lx	66%	P 0.6D-1.3R	[1.3, -0.6]	53.3 > 16 lx	333%
P 4U-8L	[-8, 4]	0.621 > 0.102 lx	607%	P 0.5U-1.5LtoL	[-1.5, 0.5]	1.6 < 1.6 lx	100%	P 0.86D-V	[0, -0.86]	57.5 > 7.2 lx	799%
P 4U-8R	[8, 4]	0.615 > 0.102 lx	600%	P 0.5U-1Rto3R max	[1.5, 0.5]	2.01 < 4.32 lx	47%	P 0.86D-3.5L	[-3.5, -0.61]	2.88 < 18.9 < 19.2 lx	99%
P 2U-4L	[-4, 2]	0.58 > 0.216 lx	269%	P 0.5U-1Rto3R min	[3, 0.5]	1.75 > 0.8 lx	218%	P 1.5D-2R	[2, -1.5]	52.1 > 24 lx	217%
P 1.5U-1Rto3R	[1, 1.5]	1.02 > 0.32 lx	317%	P H-4L	[-4, 0]	2.86 > 0.216 lx	1325%	P 2D-9L	[-9, -2]	27.4 > 2 lx	1371%
P 1.5U-1RtoR	[1.7, 1.5]	1.15 < 2.24 lx	51%	P H-8L	[-8, 0]	3.66 > 0.102 lx	3572%	P 2D-9R	[9, -2]	28.5 > 2 lx	1424%
P 2D-15L	[-15, -2]	12.8 > 1.6 lx	800%								
P 2D-15R	[15, -2]	15.4 > 1.6 lx	962%								
P 4D-4R	[4, -4]	13.2 < 20 lx	66%								
P 4D-20L	[-20, -4]	2.31 > 0.48 lx	482%								
P 4D-20R	[20, -4]	2.51 > 0.48 lx	522%								



Obr. 7.11 Změřená fotometrická mapa (SPDT technologie)

7.5.3. Ověření naměřených dat pomocí STL – SPDT technologie



Obr. 7.12 Fotometrická mapa – simulace STL (SPDT technologie)

Hodnota naměřeného gradientu v řezu 2R činila 0,328.

8. Posouzení navržených a změřených optických parametrů

Pro posouzení budeme potřebovat znát hodnoty gradientů čoček, vzhled a také plnění fotometrie. Tyto parametry jsem získal měřením v minulé kapitole. Při optickém posouzení designu se často porovnává také celkový světelný tok a maximální hodnota intenzity osvětlení. Tyto dva parametry jsem zde ale neuvedl, protože hodnoty těchto parametrů byly velice podobné a neměly vliv na posouzení. Pro lepší přehlednost znovu uvedu hlavní rozdíly mezi jednotlivými čočkami vyrobenými jednotlivými metodami obrábění.

8.1. Posouzení gradientů

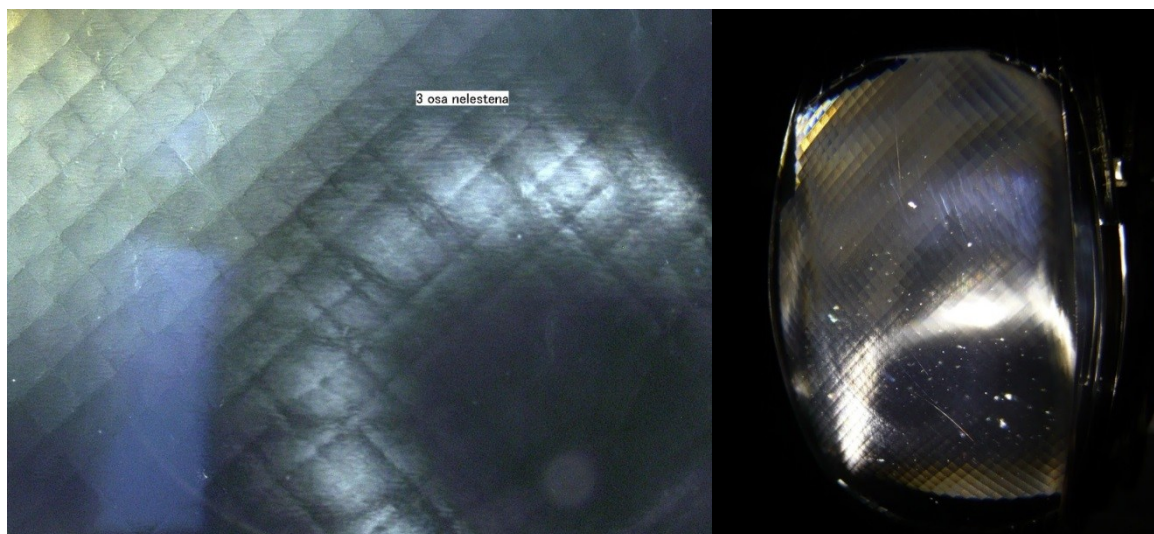
Tab. 8.1 Přehled naměřených gradientů jednotlivých čoček

Technologie	Gradient 2R	Gradient 12L – 12R
3osá technologie – neleštěná	0,155	0,099-0,157
3osá technologie – leštěná	0,194	0,134-0,25
5osá technologie	0,281	0,175-0,35
SPDT technologie	0,207	0,151-0,296

Pro vyhovující hodnotu gradientu jsem si určil pro řez 2R hodnotu 0,2. Dle tabulky vidíme, že nejvíce se této hodnotě blížila čočka, vyrobená ve formě technologii SPDT. Vyhovující by však byla i čočka vyrobená v leštěné formě pomocí 3osého frézování. Srovnáme-li gradienty ve všech řezech a porovnáme s požadavkem zákazníka, tak nejlépe opět dopadly technologie SPDT a 3osá – leštěná forma. Pro 3osou technologii, ve formě neleštěné můžeme říci, že výsledky gradientů byly nepřijatelné, a to jak v řezu 2R, tak i v celém rozsahu svazku. Hranice svazku byla příliš rozmazaná. Pro 5osou technologii byla hranice svazku na rozdíl od neleštěné formy 3osé technologie příliš ostrá a s úhlovou vzdáleností od středu svazku se hodnota gradientu příliš měnila.

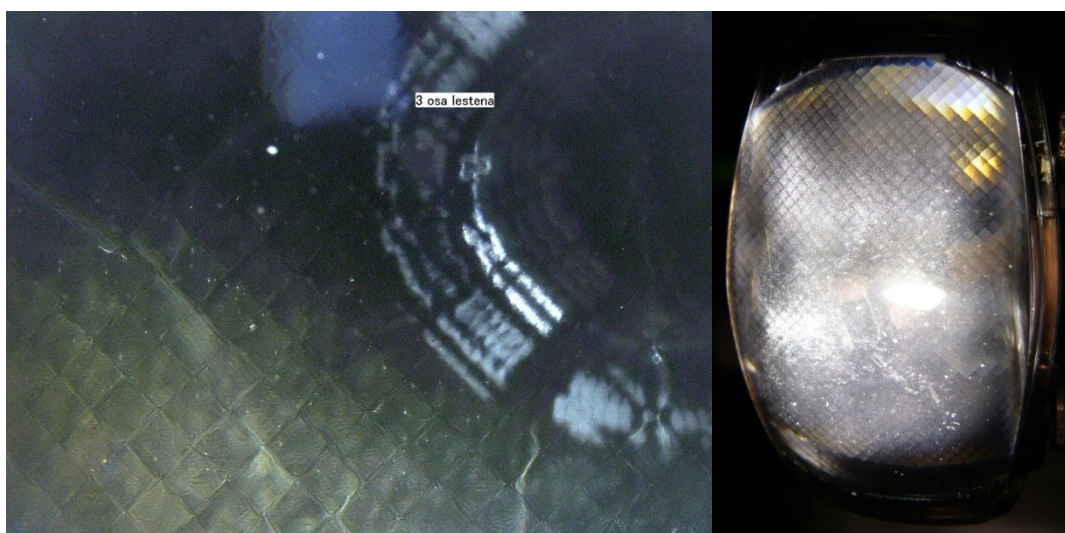
8.2. Posouzení vzhledu a kvality výroby textury

Dalším důležitým parametrem pro posouzení čoček je vzhled, protože je to část, která je viditelným a zároveň designovým prvkem světloometu. Jednotlivé čočky nesměly obsahovat vady, které by mohly jít vidět a kazily by tak dojem celkového světloometu. Posuzoval jsem vzhled z hlediska výskytu krupiček, stop po fríze, přítomnosti vlasečnic a také kvalitu vyrobené textury pomocí mikroskopu. Pro zákazníka samozřejmě není důležité mít kvalitní vzhled z mikroskopického pohledu, avšak při vyhodnocování textur mi tyto záznamy mnoho pomohly pochopit důvod určitých rozdílů mezi čočkami.



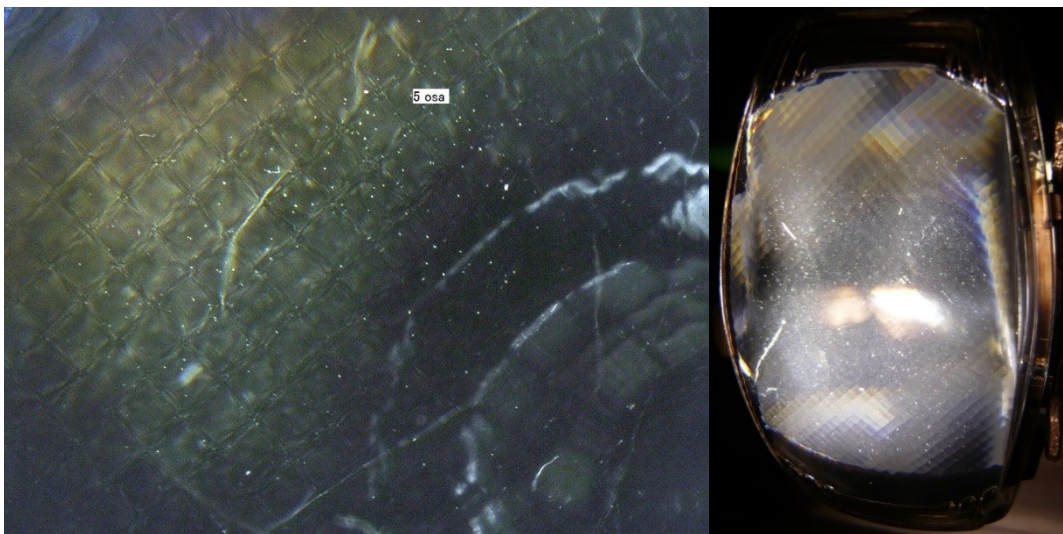
Obr. 8.1 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 3osá technologie – neleštěná forma

Při pohledu na mikroskopický detail lze vidět, že textura, tedy čtvercová síť, má na svém povrchu nepravidelné struktury, které odpovídají stopám po fréze. Při pohledu na celou čočku, tyto stopy vidíme také, navíc i docela výrazné výskyty vlasečnic. Vzhled této čočky jsem neakceptoval. Navíc čočka vyrobená v neleštěné formě 3osou technologií, měla při měření více nevyhovujících výsledků.



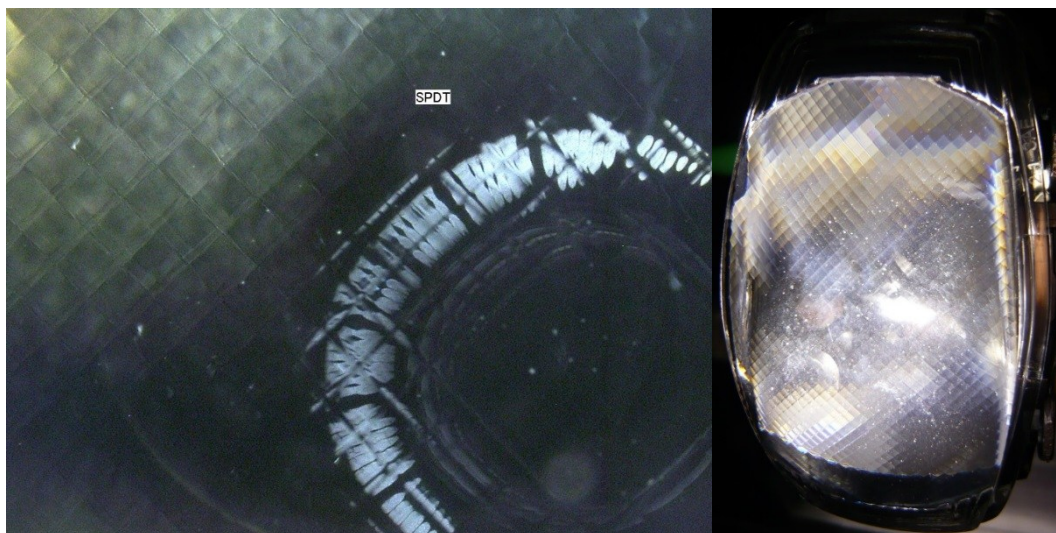
Obr. 8.2 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 3osá technologie – leštěná forma

U leštěné formy 3osé technologie dopadl mikroskopický pohled mnohem lépe. Leštěním jsme eliminovali stopy po fréze, ale objevovaly se krupičky po celé ploše čočky. Proto jsem tuto čočku musel také označit za nepřijatelnou.



Obr. 8.3 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 5osá technologie

5osá technologie nám, co se týče vzhledu, velice pomohla. Mikroskopický pohled ukázal, že textura je krásně hladká, bez jakýchkoliv stop a celá čočka vypadá mnohem lépe. Stále se na čočce vyskytovaly krupičky, ale ne v tak velkém rozsahu jako u 3osého obrábění. Vzhled čočky jsem ohodnotil jako vyhovující.

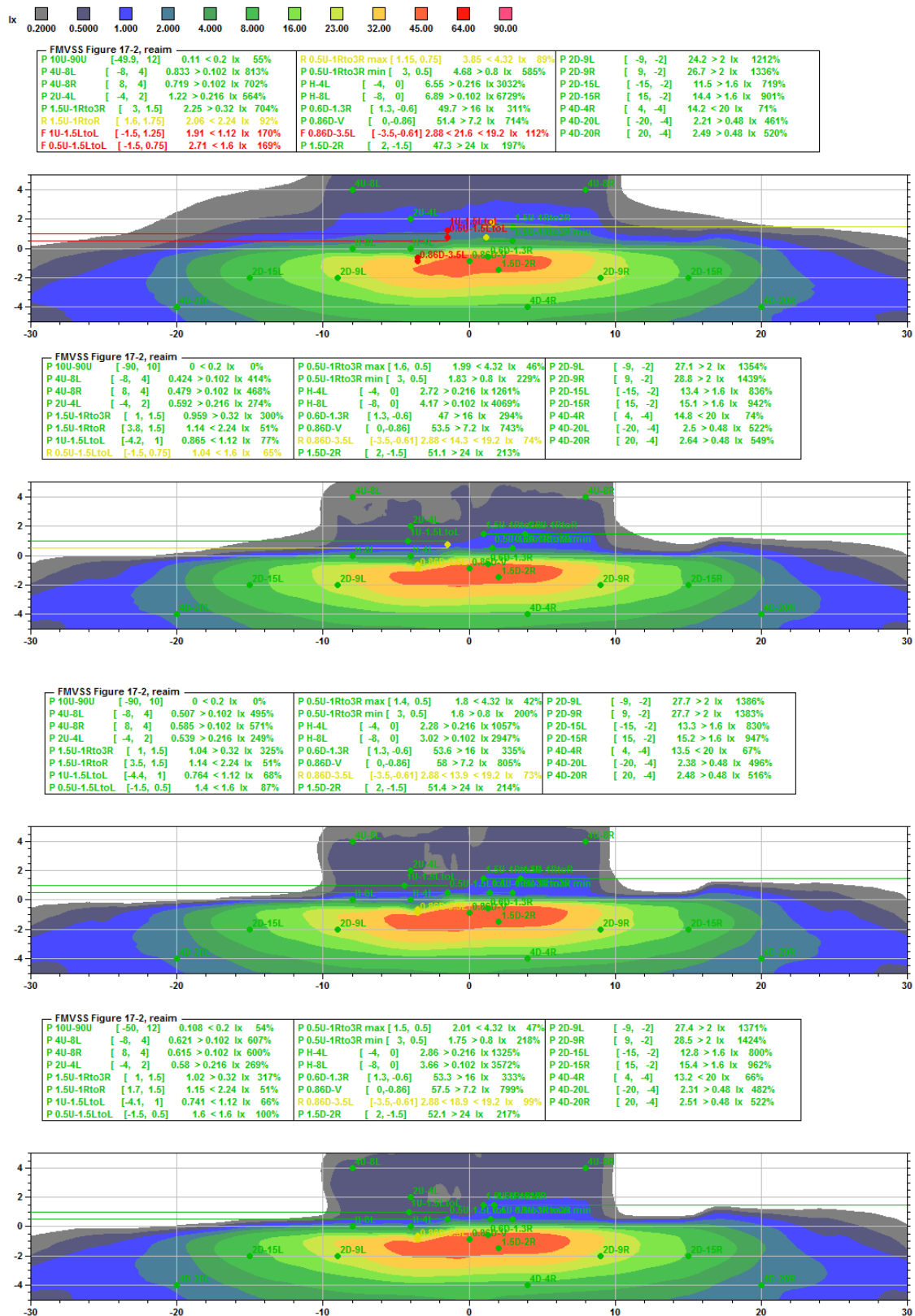


Obr. 8.4 Mikroskopický pohled (vlevo), foto měřené čočky D544 – 3osá technologie – neleštěná forma

Jelikož SPDT technologie se řadí mezi nejpřesnější technologie obrábění, tato čočka, co se týče vzhledu, dopadla nejlépe. Na mikroskopu se textura jevila jako nejlepší a celková čočka dělala nejlepší dojem. Krupiček jsme se stále nezbavili, ale celkový vzhled byl u SPDT technologie nejlepší.

8.3. Posouzení fotometrie

Různou metodou výroby se neměnily pouze hodnoty gradientů, ale také intenzity osvětlení v celém svazku. Pro posouzení fotometrie jsem vždy u každého měření přiložil fotometrickou mapu s detailem na střed svazku, ve kterém se vyskytuje nejvíce fotometrických bodů. Nejhůře dopadla čočka z neleštěné formy 3osé technologie. U této čočky nevycházely určité body fotometrie a svazek by oslňoval protijedoucí řidiče. U ostatních technologií, dopadla fotometrie pozitivně. Pouze některé body byly na hraně legitimacy.



Obr. 8.5 Porovnání fotometrie (shora) 3osá technologie – neleštěná forma, 3osá technologie – leštěná forma, 5osá technologie, SPDT technologie

8.4. Závěr posouzení

Začneme-li vyhodnocováním gradientu tak jediné čočky, které by obstály, byly čočky vyrobené ve formě technologií SPDT a 3osé frézování – ruční leštění. Z hlediska fotometrie vyhovovaly obě čočky a může se zdát, že 3osá technologie je pro tuto čočku dostačující a je i vhodnějším typem výroby z hlediska ceny. Avšak vzhled čoček rozhodl a pro náš případ musíme použít technologii SPDT, která je zároveň i nejdražší, ale splňuje všechny parametry, zadané zákazníkem. Pokud vyhodnotím naskenované čočky a jejich zpětnou simulaci, tak dle přiložených fotometrických map a hodnot gradientu v podstatě nemohu říci, že se jedná o stejnou čočku. Některé hodnoty simulací STL se blíží k hodnotám naměřeným, avšak fotometrické mapy vypadají odlišně. Navíc u nejpřesnější technologie výroby SPDT jsem následnou simulací této čočky došel k nejodlišnějším výsledkům. Je to dáno tím, že textura je opravdu miniaturních rozměrů a při skenování se nanáší na čočky vrstva titanového prášku, aby se laserový paprsek neodrážel od skenované plochy. Toto pokrytí bohužel texturu zaplní, a i s přesností zařízení přibližně 0,02-0,03 mm nedosáhneme korektního naskenování.

Závěr

Tématem této diplomové práce bylo navrhnout texturu na čočce projektoru tak, abychom splnili veškeré předpisy a požadavky zákazníka. Požadavkům zákazníka myslíme homogenní svazek a hlavně gradient, jehož hodnota byla zadána v přesném rozmezí. V první kapitole jsem stručně shrnul některé předpisy, používané v předních osvětlovacích systémech a základní požadavky na výstupní světelný svazek.

Ve druhé kapitole popisují světelné zdroje, které se nejčastěji používají v předních světlometech, obzvláště v projektorech. Větší důraz jsem přikládal na LED diody, jelikož jsou dnes nejpoužívanější a mají pro nás značné výhody. Díky LED diodě, je například projektor D544, tak malý a také účinný. Ve světlometech také díky LED diodám dokážeme vytvořit různé tvary denního svícení a přispět tak k většímu prostoru pro design celého světlometu. Nevýhodou LED diody je bohužel její teplotní závislost, která se pak promítá na velikosti hliníkového chladiče.

V kapitole třetí jsem popsal celý světlomet D544. Následně pak používané optické systémy v automobilových světlometech. U starších automobilů ještě i dnes můžeme vidět reflektorový systém s optikou na skle. Časem ho ale vystřídal reflektorový systém free form, tvořený béziovými pláty a který dodnes patří mezi nejpoužívanější systémy. Důvodem jsou širší možnosti při návrhu. Pro nejvyšší řady výbavy automobilů se používají světlometry vybavené projektorovým systémem. Tento systém začal být velice oblíbený a v dnešní době je už žádán i do nižších řad výbavy. Projektorový systém dnes může obstarávat všechny hlavní funkce světlometu a plní ty nejnáročnější požadavky zákazníků. Jedna z dnes největších výhod projektorového systému je tzv. matrix systém, kterým dokážeme vystínit protijedoucí automobily.

V další kapitole vysvětluji, jak probíhá simulace optických systémů softwarem a s jakými optickými zákony musí program počítat, abychom dostali výsledky podobající se nejvíce reálnému výstupu ze světlometu.

Pátá kapitola popisuje samotný projektor D544. Snažil jsem se popsat každý optický díl tohoto projektoru a jeho funkci. Také jsem poukázal, jak vypadají navržené plochy optického systému, materiály dílčích částí a účinnost celého systému.

Hlavním cílem této práce, bylo ale navržení textury na čočku projektoru D544 a následně její výrobu. V šesté kapitole se věnuji návrhu textury, a jaký je její dopad na optický výstup. Textura na čočce se vytváří pomocí NURBS ploch. Díky těmto plochám, dostaneme mřížkovou strukturu na čočce, která má mírné vypouklé tzv. polštářky. Tyto polštářky slouží k rozptýlení světla. Světelný svazek je tak homogennější a gradient svazku je tak nižší. Bez aplikace textury je gradient příliš vysoký a hranice svazku je tak ostřejší. Ostrá hranice je pak nepříjemně vnímána na vozovce a je také nepřijatelná hlediska zákaznickým požadavkům.

Následně pak v 7. a 8. kapitole se věnuji měřením a posouzením vyrobených čoček. Textura na čočce je opravdu malých rozměrů, a i v dnešní době je dosti složité tyto plochy ve formě obrobít. Navržená textura na čočce splňovala v simulacích veškeré požadavky a mým dalším úkolem bylo zvolit metodu obrábění, která čočky vyrobí tak, abychom dosáhli simulovaných výstupů. Ze všech

nejznámější jsou metody obrábění pomocí 3osé a 5osé frézy. Mezi méně známou, ale zároveň nejpresnější metodu patří SPDT. Tato metoda používá k obrábění diamant a dokáže obrobit optické plochy s velkou přesností. Zároveň je také tato metoda nejdražší. Vyhodnocování měření probíhalo ve třech krocích. V prvním kroku jsem vyhodnocoval hodnotu gradientu v řezu 2R, který měl mít hodnotu 0,2. Následně i v celém rozsahu zadaném zákazníkem. Tedy od 12L – 12R. Ve druhém kroku jsem změřil fotometrickou mapu, u které jsem vyhodnotil, zdali projektor splňuje všechny fotometrické body předpisu. Posledním krokem, stejně důležitým pro zákazníka, byl vzhled čočky. Z každého měření, jsem následně nechal čočku naskenovat ve 3D. Data naskenované čočky jsem následně převedl do počítačového prostředí, ve kterém jsem se snažil opětovně čočku nasimulovat, tak jako u návrhu této čočky. To se mi bohužel nepodařilo, protože vrstva titanového prášku, která se nanáší na čočky při skenování, mi texturu na čočce zakryla, a tak jsem nedokázal získat stejné výsledky ze simulace jako z měření. Stále si myslím, že metoda měření je nejspolehlivější a zároveň lze vyhodnotit více parametrů. Otázkou je, jaký systém skenování ploch použít, abychom jsme po převedení a následném simulování v PC dostali výsledky blížíící se reálnému měření.

U 3osého frézování se na čočkách objevovaly stopy po fríze, které byly nepřijatelné z hlediska požadavků zákazníka na design. To ale nebylo jediným důvodem, proč jsem tuto metodu zavrhl. Použitím této čočky, nesplňoval projektor některé fotometrické body dle předpisu a gradient nebyl v zadaném rozmezí zákazníkem. Hodnota naměřeného gradientu v řezu 2R byla 0,155. Následně jsme formu přešetili, tím jsme eliminovali stopy po fríze a projektor vyhovoval z hlediska předpisu a hodnoty gradientů. Hodnota gradientu v řezu 2R měla ukázkovou hodnotu, dle simulace. Tato hodnota činila 0,194. Z hlediska designu ale čočka nevyhovovala, protože obsahovala velké množství bílých krupiček. 5osé frézování je značně přesnější metoda, a proto nebylo třeba tuto formu v průběhu lisování leštit. Vzhled čočky se nám tedy výrazně zlepšil, ale hodnoty naměřených gradientů nebyly v požadovaném rozmezí. Hranice svazku byla příliš ostrá. Hodnota naměřeného gradientu v řezu 2R byla 0,281. Zbývala metoda SPDT, na kterou jsem nejvíce spoléhal. Tato metoda se opravdu ukázala jako nejpresnější. Dokázala tedy optickou plochu (texturu) obrobit ve formě přesněji jako ostatní metody frézování. Vzhled čočky byl i přes mírný výskyt krupiček nejpríjetelnější. Z hlediska fotometrie, projektor splňoval všechny fotometrické body a hodnota gradientu v řezu 2R byla dle požadované hodnoty. Tato hodnota činila 0,207. Naměřený gradient v rozmezí 12L – 12R, mírně přesahoval zadané rozmezí zákazníkem, avšak rozmezí bylo přijatelné a schválené.

Seznam literatury a použitých informačních zdrojů

- [1] DOHODA O PŘIJETÍ JEDNOTNÝCH TECHNICKÝCH PRAVIDEL PRO KOLOVÁ VOZIDLA – Předpisy č. R08, R98, R112, R113, R123
- [2] *Žárovky* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.autoelektrika.cz/clanky/zarovky>
- [3] *HID* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.bulbs.com/learning/hid.aspx>
- [4] *OSVĚTLENÍ AUTOMOBILU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64553. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [5] *Electronic devices and circuits* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/lightemittingdiodeledconstructionworking.html>
- [6] *How led produce white light* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: http://www.photonstartechnology.com/learn/how_leds_produce_white_light
- [7] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [8] *Cars* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.motortrend.com/cars/lincoln/continental/2017/2017-lincoln-continental-black-label-awd-first-drive-review/#2017-lincoln-continental-headlight>
- [9] *Headlights part 2 lowhigh beams* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.hotrodhotline.com/headlights-part-2-lowhigh-beams#.WfyDy_nWyUI
- [10] DE GREVE, Bram. *Courses: Reflections and Refractions in Ray Tracing. : Reflections and Refractions in Ray Tracing* [online]. 2006 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://graphics.stanford.edu/courses/cs148-10-summer/docs/2006--degreve--reflection_refraction.pdf
- [11] *Cocky* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/480-cocky>
- [12] *Nurb Secrets* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.pilot3d.com/NurbSecrets.htm>
- [13] *Theory Builders* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: http://www.aliasworkbench.com/theoryBuilders/TB2_nurbs2.htm
- [14] *Led* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/276-led>

[15] *ANALÝZA A INOVACE SYSTÉMŮ OSVĚTLENÍ VOZIDEL* [online]. Brno, 2011 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41246.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

[16] Přechod PN. *Fyzika jreichl* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z:

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/264-prechod-pn>

Seznam příloh

Příloha A: LUXEON Altilon H1K PnP (pdf) Příloha na CD

Příloha B: Výstup z měření gradientů (sfn) Příloha na CD

Součástí DP je CD.